



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STAVEBNÍ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ**

INSTITUTE OF BUILDING TESTING

**VYUŽITÍ TERMOGRAFICKÉ METODY PRO DIAGNOSTIKU  
BETONOVÝCH MOSTŮ**

USE OF THERMOGRAPHIC METHODS FOR DIAGNOSTICS OF CONCRETE BRIDGES

**DISERTAČNÍ PRÁCE**

DOCTORAL THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Ing. Michal Janků

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

doc. Ing. PETR CIKRLE, Ph.D.

**BRNO 2019**

## **ABSTRAKT**

Předkládaná disertační práce je zaměřena na výzkum použitelnosti termografické metody při diagnostice betonových mostů v podmínkách České republiky. Teoretická část charakterizuje vybrané poruchy betonových konstrukcí a princip jejich zjišťování. Praktická část popisuje měření provedené v laboratoři na zkušebním tělese a v terénu na betonovém mostě. Největší pozornost je věnována především infračervené termografii, georadaru a ultrazvukové pulse-echo metodě. Na základě výsledků disertační práce byly vypracovány doporučení pro použití termografické zkušební metody v praxi.

## **ABSTRACT**

This dissertation is focused on the research of the applicability of the thermographic method in the diagnosis of concrete bridges in the Czech Republic. The theoretical part characterizes selected defects of concrete structures and the principle of their detection. The practical part describes the measurements made in the laboratory on the test specimen and the field on the concrete bridge. Most attention is paid to infrared thermography, ground-penetrating radar and ultrasonic pulse-echo method. Based on the results of the dissertation, recommendations for the use of the thermographic test method in practice were developed.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Termografie, nedestruktivní testování, infračervené záření, termogram, most, georadar, metoda pulse-echo.

## **KEY WORDS**

Thermography, non-destructive testing, infrared radiation, thermogram, bridge, ground-penetrating radar, pulse-echo method.

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JANKŮ, M., *Využití termografické metody pro diagnostiku betonových mostů*. Brno, 2019. 105 s., 32 s. příl. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Cikrle, Ph.D.

### Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem disertační práci s názvem *Využití termografické metody pro diagnostiku betonových mostů* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 16. 10. 2019

.....

Ing. Michal Janků

autor práce

Děkuji vedoucímu práce doc. Ing. Petru Cikrlovi Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a připomínky, které mi poskytoval v průběhu tvorby disertační práce.

Dále děkuji kolegům z Centra dopravního výzkumu, v. v. i. za jejich pomoc při výrobě zkušebního tělesa a za asistenci při měření.



## OBSAH

1	ÚVOD .....	3
2	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE .....	4
3	SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY .....	5
3.1	Rešerše literatury .....	5
3.2	Rešerše platných předpisů .....	7
3.3	Kritické zhodnocení současného stavu .....	8
4	METODY A ZAŘÍZENÍ .....	10
4.1	Tvrdoměrné metody .....	10
4.2	Ultrazvuková impulsová metoda průchodová .....	11
4.3	Metoda pulse-echo .....	13
4.4	Georadar .....	15
4.5	Infračervená termografie .....	17
4.5.1	<i>Historie infračervené technologie .....</i>	<i>17</i>
4.5.2	<i>Infračervené záření .....</i>	<i>22</i>
4.5.3	<i>Konstrukce termokamery .....</i>	<i>23</i>
4.5.4	<i>Termogram .....</i>	<i>26</i>
4.5.5	<i>Termografické postupy .....</i>	<i>26</i>
5	HODNOCENÍ STAVU MOSTŮ .....	28
5.1	Prohlídky mostů .....	28
5.2	Metody diagnostického průzkumu .....	29
6	TEORETICKÁ ANALÝZA .....	30
6.1	Vybrané poruchy betonových konstrukcí .....	30
6.1.1	<i>Delaminace betonové vrstvy z důvodu koroze výztuže .....</i>	<i>30</i>
6.1.2	<i>Poruchy oprav betonových konstrukcí .....</i>	<i>32</i>
6.1.3	<i>Zatékání do konstrukce .....</i>	<i>33</i>
6.2	Zjišťování skrytých poruch pomocí termokamery .....	36
6.2.1	<i>Přenos tepla vedením .....</i>	<i>36</i>
6.2.2	<i>Přenos tepla prouděním .....</i>	<i>37</i>
6.2.3	<i>Přenos tepla zářením .....</i>	<i>37</i>
6.2.4	<i>Vznik teplotního kontrastu v místě poruchy .....</i>	<i>38</i>
6.2.5	<i>Rovnice termografie .....</i>	<i>39</i>
6.2.6	<i>Parametry ovlivňující měření .....</i>	<i>41</i>
7	EXPERIMENT NA ZKUŠEBNÍM TĚLESE .....	43
7.1	Návrh a výroba zkušebního tělesa .....	43

7.2	Odrazové tvrdoměry schmidt.....	45
7.2.1	Tvrdoměr Schmidt typ N .....	45
7.2.2	Tvrdoměr Silver Schmidt.....	46
7.3	Ultrazvuk.....	47
7.3.1	Průchodová metoda .....	47
7.3.2	Metoda Pulse-echo.....	48
7.4	Georadar.....	50
7.4.1	Georadar GSSI.....	51
7.4.2	Georadar Hilti PS 1000.....	55
7.4.3	Georadar Proceq GP8000.....	57
7.5	Termokamera .....	61
7.5.1	Měření ve stínu.....	62
7.5.2	Měření na slunci .....	65
7.6	Odběr jádrových mikro-vývrtů .....	67
7.7	Porovnání naměřených hloubek.....	68
8	POROVNÁVACÍ MĚŘENÍ NA MOSTĚ .....	71
8.1	Termokamera .....	73
8.2	Georadar.....	73
8.2.1	Georadar GSSI.....	74
8.2.2	Georadar Proceq GP8000.....	78
8.3	Metoda pulse-echo .....	81
8.4	Destruktivní ověření.....	82
9	TERMOGRAFIKÉ ZKOUŠENÍ V PRAXI.....	84
9.1	Doba měření.....	84
9.2	Nastavení termokamery .....	86
9.3	Zpracování termogramů.....	87
10	ZÁVĚR A SHRNUÍ .....	88
	SEZNAM LITERATURY .....	90
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	99
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	100
	SEZNAM TABULEK .....	104
	SEZNAM PŘÍLOH.....	105

# 1 ÚVOD

Kvalitní a udržovaná infrastruktura je znakem dobře fungujícího národního hospodářství a potažmo vyspělosti celé společnosti. Za účelem zachování řádného stavu budov, mostů, silnic a dalších staveb je nezbytná jejich pravidelná údržba. Často platí, že pokud se podaří zachytit poruchu na počátku jejího vzniku, jsou náklady na její odstranění daleko nižší než po měsících až letech nekontrolované degradace. Lokalizovat poruchu včas, často znamená, detekovat ji ještě dříve, než je viditelná pouhým okem. Klíčovým prostředkem ke zjištění skrytých defektů jsou metody nedestruktivního testování.

Během posledních desetiletí byly vyvinuty nové technologie umožňující provádět nedestruktivní měření poměrně rychle a levně. Je však potřeba stále pracovat na popularizaci těchto metod mezi širokou odbornou veřejností. Zároveň je nutné předem vysvětlit možnosti daných metod, aby se předešlo nereálným očekáváním a zklamáním. Samozřejmostí je pak odbornost technika provádějícího měření, která by měla zaručit správnost výsledků.

Disertační práce se zaměřuje na srovnání nedestruktivních metod při lokalizaci poruch typu delaminace. Za tímto účelem bylo navrženo a vytvořeno zkušební těleso – betonový blok s uměle vytvořenými defekty (dutinami). Pomocí infračervené termografie, georadaru a ultrazvuku byla měřena hloubka a tvar umělých defektů. Po měření na betonovém bloku následovalo nedestruktivní zkoušení vybraného betonového mostu. Jednotlivé metody byly mezi sebou porovnány s ohledem na přesnost měření, časovou náročnost, použitelnost a cenu. Zvláštní pozornost byla věnována termografické zkušební metodě. Poznatky získané během měření a zpracování disertační práce byly využity při přípravě certifikované metodiky zaměřené na využití termografického zkoušení při diagnostice staveb dopravní infrastruktury.

## 2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Téma předkládané disertační práce bylo motivováno rozvojem v oblasti měřicí termografické techniky. Nové moderní přístroje umožňují rychlé bezkontaktní měření a lokalizaci skrytých poruch. Zároveň zatím není použití termografické zkušební metody při diagnostice betonových mostů v České republice příliš běžné. Proto je také dílčím cílem přispět k rozšíření této metody mezi odbornou veřejnost.

Hlavní cíle disertační práce spočívaly v ověření použitelnosti termografické zkušební metody při diagnostice betonových, železobetonových a předpjatých mostních konstrukcí. Cíle práce lze rozdělit na teoretickou a praktickou část následovně:

### A. Teoretická část:

- Provedení rešerše odborné literatury týkající se použití termografické zkušební metody a dalších NDT metod.
- Vytvoření přehledu použitých metod a zařízení.
- Popis vybraných poruch betonových konstrukcí včetně příčin jejich vzniku a projevů.
- Popis fyzikálních principů umožňujících nedestruktivní zjišťování skrytých poruch pomocí termografické zkušební metody.

### B. Praktická část:

- Návrh a výroba zkušebního tělesa.
- Provedení srovnávacích měření na zkušebním tělese pomocí termografické zkušební metody, georadarové metody, ultrazvukové pulse-echo metody a dalších.
- Vyhodnocení měření a návrh srovnávacího měření na betonovém mostě.
- Provedení srovnávacího měření na vybraném mostě.

Po splnění všech cílů teoretické a praktické části disertační práce bude vypracováno doporučení pro provádění termografického zkoušení betonových, železobetonových a předpjatých mostů. Cíle práce byly zvoleny v souladu se zadáním disertační práce pro objasnění sledované problematiky.

### 3 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Mosty jsou v České republice navrhovány na plánovanou životnost 100 let. Za tuto dobu jsou různé části mostu vystaveny nepříznivým vlivům, které zkracují jejich životnost. Příčiny poruch jsou různé, nicméně statisticky je nejvíce prostředků vynakládáno na opravy zapříčiněné korozí výztuže. Jedním z následků koroze ocelové výztuže je i delaminace krycí betonové vrstvy.

Při opravách je obvykle odsekána betonová krycí vrstva nad zkorodovanou výztuží, výztuž je zbavena koroze a je na ni nanesen antikorozní povlak, poté následují vrstvy sanačního systému. Bohužel se poměrně často stává, že opravy nedosahují požadované životnosti. Nekvalitně provedená oprava má zpravidla za následek opětovný vznik poruch. Mezi nejčastější příklady patří oddělení vrstev sanačního systému od podkladu a výskyt nové a/nebo pokračující koroze [1].

#### 3.1 REŠERŠE LITERATURY

Poškození mostu zapříčiněné korozí výztuže bývá zpravidla patrné na nosné konstrukci mostu nebo na opěrách. Může se však vyskytovat i na přímo pojižděných betonových mostovkách. Mosty s tímto typem mostovky jsou často používány ve Spojených státech amerických. Jak je patrné z názvu, vozidla na těchto mostovkách jezdí přímo po betonovém povrchu mostovky. V České republice a v mnoha dalších evropských státech je oproti tomuto řešení mnohem častější překrytí betonové mostovky dalšími vrstvami (primární, izolační, ochranná a obrusná). Výhodou přímo pojižděné mostovky je rychlejší a levnější výstavba. Nevýhodou naopak představuje zvýšené riziko koroze výztuže v přímo pojižděné mostovce, která je chráněna pouze samotným betonem, případně protikorozním nátěrem.

Řešení problémů s korozí výztuže v přímo pojižděných mostovkách a lokalizace s ní souvisejících delaminací představuje jeden z hlavních úkolů pro personál zajišťující údržbu těchto mostů. Aby mohli organizace spravující silniční a dálniční síť efektivně rozhodovat o načasování údržby, oprav nebo rekonstrukcí, je potřeba znát skutečný stav mostů. Užitečným nástrojem mohou být metody nedestruktivního testování. Velké srovnání nejběžnějších NDT metod používaných při hodnocení stavu přímo pojižděných betonových mostovek uvádí zpráva S2-R06A-RR-1 [2].

Výhody a omezení různých NDT metod při diagnostice stavu přímo pojižděných mostovek zkoumala řada dalších výzkumných týmů [3-6]. Další srovnání těchto metod byla provedena v laboratořích na zkušebních tělesech [7-11]. Měření na vodorovných površích jako je přímo pojižděná mostovka lze v některých případech s výhodou provádět z jedoucích vozidel nebo pomocí různě automatizovaných měřicích zařízení [12]. Díky tomu lze měření provádět efektivně a na velkých plochách.

V České republice se téměř žádné mosty s přímo-pojižděnou mostovkou nevyskytují, princip nedestruktivních metod však zůstává stejný. Disertační práce se tedy soustředí na jiné části mostů, jako jsou opěry a nosníky, přičemž měření bylo realizováno

na jejich vertikálních plochách. Tyto prvky nejsou do takové míry vystaveny mechanickému namáhání jako v případě přímo-pojížděné mostovky. Ke korozi výztuže, jak je ostatně velmi dobře známo, dochází i zde.

Jednou z metod používaných tradičně již od 80. let 20. století k lokalizaci delaminací v přímo-pojížděné mostovce je infračervená termografie [13, 14]. Od té doby došlo k velkému pokroku v měřicí technice. Termokamery jsou dnes mnohem citlivější, přesnější, nabízí daleko vyšší rozlišení a jsou i cenově dostupnější. Měřit lze i povrchy, které nejsou přímo ohřívány slunečním zářením [15]. Je však potřeba rozumět předpokladům vzniku teplotních kontrastů na povrchu zkoumaného objektu [16]. Měření je totiž závislé na klimatických podmínkách a lze jej provádět jen ve vhodné denní dobu [17]. Určité pokusy s měřením byly realizovány i na zděných mostech [18]. Jiní autoři zase prováděli experimenty na zkušebních tělesech [19] a zkoumaly účinek slunečního záření [20], vliv vlastností betonu [21], či typu poruchy [22] na velikosti teplotního kontrastu.

Další z metod, jež začíná být stále více uznávána i v České republice, je georadar. Zatímco u nás ještě v minulých letech nevzbuzoval příliš velkou důvěru, jinde ve světě, a především v USA se již desítky let využíval v nejrůznějších aplikacích stavebního inženýrství [23]. Za tuto dobu se rozvinula nejen metoda samotná, ale došlo i k velkému progresu v oblasti měřicí techniky. Mezi nejrozšířenější aplikace patří inspekce železobetonových mostů [24, 25] a ostění tunelů [26], stanovení tloušťek vrstev vozovek [27, 28], archeologický průzkum [29], geofyzikální průzkum [30], lokalizace výztuže [31, 32], ověřování pozice kluzných trnů a kotev v cementobetonových vozovkách [33] a další.

Ultrazvuková impulzová metoda bývala tradičně využívána ke stanovení rovnoměrnosti betonu, modulu pružnosti nebo pevnosti betonu v tlaku a ke sledování změn těchto vlastností v čase [34]. Častější využití nacházela tato metoda spíše v laboratoři, měření na konstrukcích bylo prováděno jako doplněk k jádrovým vývrtům a umožňovalo snížit jejich celkový počet. Díky omezení počtu jádrových vývrtů lze provádět zkoušení šetrnějším způsobem s minimem destruktivních zásahů, což je příhodné především u historicky cenných objektů [35]. Experimentálně byla také zkoumána možnost lokalizovat delaminace v betonu na základě změn průchodové rychlosti ultrazvukového signálu [36]. V posledních letech se dostávají na trh nové moderní přístroje vybavené odrazovými sondami. Tyto sondy umožňují provádět měření pouze z jedné strany a jsou mimo jiné vhodné k lokalizaci dutin [37], ke kontrole správného zainjektování kabelových kanálků v dodatečně předepjatých konstrukcích [38, 39], či ke stanovení tloušťky ostění tunelů [40].

### 3.2 REŠERŠE PLATNÝCH PŘEDPISŮ

V této kapitole jsou uvedeny předpisy a normy týkající se diagnostiky mostů a nedestruktivních metod použitých při měření během řešení disertační práce.

**TP 72** určují cíle, účel rozsah, metody, termíny, podklady a postupy při provádění diagnostického průzkumu mostů. Základním cílem diagnostického průzkumu je zjištění příčin vzniku poruch nebo degradace konstrukce a určení jejich vlivu na bezpečnost a dobu životnosti objektu. Diagnostické metody používané při průzkumech prováděných na mostních objektech lze členit na vizuální kontrolu (prohlídky), mechanické a fyzikální metody, chemické a fyzikálně-chemické metody, geodetické, dynamometrické a metody geotechnického průzkumu. Předmětem těchto technických podmínek (TP) je určení postupu při hodnocení stavu mostů a dalších podobných objektů provozovaných na pozemních komunikacích. Nejsou zde popsány detailní postupy pro jednotlivé zkušební metody, pouze jejich použití a výklad [41].

**ČSN 73 6221** definuje postup při provádění prohlídek mostů a lávek, po nichž je vedena pozemní komunikace a/nebo tramvajová, trolejbusová nebo speciální dráha. Norma definuje čtyři druhy prohlídek (běžné, hlavní, mimořádné a kontrolní) a kromě jejich rozsahu stanovuje i termíny jejich provádění v závislosti na klasifikačním stupni stavu mostu. Těchto stupňů norma rozlišuje celkem sedm: I – bezvadný stav, II – velmi dobrý stav, III – dobrý stav, IV – uspokojivý stav, V – špatný stav, VI – velmi špatný stav, VII – havarijní stav. Na základě závěrů hlavních nebo mimořádných prohlídek mostů zajišťuje správce mostu v případě potřeby diagnostický průzkum [42].

**ČSN 73 2011** stanoví ověřené národní postupy pro nedestruktivní zkoušení betonových stavebních konstrukcí, částí konstrukcí a dílců. Podle této normy lze stanovit vlastnosti betonu konstrukce a vlastnosti betonové konstrukce a dílců [43].

**ČSN 73 1373** uvádí postup pro zkoušení a hodnocení mechanických vlastností obyčejného hutného betonu, zpravidla pevnosti betonu v tlaku, při použití tvrdoměrných metod zkoušení [44].

**ČSN EN 12504-2** uvádí postup pro stanovení tvrdosti odrazovým tvrdoměrem na povrchu ztvrdlého betonu pomocí ocelového berana vymrštěného pružinou. Normu lze využít pro posouzení stejnoměrnosti uloženého betonu, k ohraničení míst nebo oblastí s nižší jakostí nebo narušeného betonu v konstrukcích [45].

**ČSN 73 1371** uvádí postup pro zkoušení a hodnocení vlastností obyčejného i lehkého hutného betonu na základě stanovení rychlosti šíření impulsu ultrazvukových podélných vln [46].

**ČSN EN 12504-4** uvádí postup pro stanovení rychlosti šíření impulsu ultrazvukových podélných vln v betonu pro různé aplikace [47].

**ČSN EN 16714-1** popisuje obecné postupy termografického nedestruktivního zkoušení. Termografické zkoušení se používá pro detekci a lokalizaci nehomogenit (např. trhlin, delaminací a vměstků) v různých materiálech (např. kompozitech, kovech a povlacích) [48].

**ČSN EN 16714-2** popisuje vlastnosti a požadavky na infračervené kamery použité pro termografické nedestruktivní zkoušení [49].

**ČSN EN 16714-3** stanovuje termíny a definice pro termografické zkoušení [50].

**ČSN ISO 18434-1** popisuje všeobecné zásady a postupy při použití termografické techniky pro monitorování stavu a diagnostiku strojů a jejich dílů. V normě jsou dále popsány jednotlivé termografické techniky a jsou zde uvedeny termíny a definice týkající se termografie, které by měly být používány všude tam, kde se používá termografická technika obecně [51].

**ASTM D4788 - 03(2013)** je americká norma popisující zásady při detekci delaminací v mostovkách použitím IR termografie. Tato norma vešla v platnost již v roce 1988 a od té doby byla několikrát revidována. Norma popisuje proces měření na přímo pojížděné betonové mostovce, případně na asfaltové vozovce na mostě. Jsou zde uvedeny nezbytné klimatické podmínky potřebné k provedení měření jako například počet hodin přímého slunečního svitu, maximální rychlost větru a další [52].

**ASTM D6087 - 08(2015)e1** je americká norma, která uvádí obecné postupy pro určení stavu asfaltem pokrytých či přímo pojížděných betonových mostovek pomocí georadarové metody. Norma se soustředí na poruchy (delaminace) způsobené korozí ocelové výztuže [53].

### 3.3 KRITICKÉ ZHODNOCENÍ SOUČASNÉHO STAVU

Betonové mosty se začaly na území České republiky (tehdy Rakouska-Uherska) stavět v 90. letech 19. století. Úplně první silniční most se klene přes říčku Rokytka v Zenklově ulici v Pražské čtvrti Libeň [54]. Tento most byl postaven v roce 1896 z dusaného betonu a již od svého počátku slouží jak silniční, tak i tramvajové dopravě. Jen o několik málo let později se začaly na našem území stavět i první železobetonové mosty. První silniční most z přepjatého betonu v Československu byl navržen Ing. Dr. L. Pacholíkem a postaven v roce 1947 na projektovaném úseku dálnice v Koberovicích [55].

Během 20. století byly na území Československa postaveny tisíce betonových mostů a v současnosti představuje beton nejběžnější typ materiálu, z něhož jsou mosty na pozemních komunikacích budovány. Mosty z prostého betonu, železobetonu a předpjatého betonu tvoří (spolu se zděnými) cca 90 % z celkového počtu přibližně 17,6 tis. mostů na dálnicích a silnicích I., II. a III. třídy. Do tohoto čísla nejsou zahrnuty mosty na místních a účelových komunikacích ve městech a obcích, jejichž celkový počet je odhadován na 14 000.

Další velkou skupinu tvoří železniční mosty, jejich počet se v České republice pohybuje kolem 6,8 tisíc. Podíl betonových mostů je však na železnici daleko menší díky většímu zastoupení ocelových mostů. Konstrukce železničních mostů je také v porovnání se silničními mosty mnohem častěji tvořena kamenným či cihelným zdivem, přičemž průměrné stáří železničních mostů činí přes 80 let a třetina mostů je starších více jak 120 let [56].



Informace o počtu a stavu mostů na pozemních komunikacích shromažďuje v České republice silniční databanka [57]. Podrobné technické údaje o jednotlivých mostech lze vyhledat v databázi Systému hospodaření s mosty [58]. Omezený přístup do databáze je umožněn i veřejnosti. Bez přihlášení lze nicméně v aplikaci zjistit pouze název mostu, jméno správce a stupeň stavebního stavu. Správci a pověřené osoby mohou navíc do databáze vkládat údaje a fotografie z mostních prohlídek a upravovat hodnocení stavebního stavu objektu.

Ačkoliv jsou mosty navrhovány na plánovanou životnost 100 let, neznamená to, že by se jim během této doby nemusela věnovat pozornost. Již desítky let se mezi odborníky přetřásá problematika nevyhovujícího stavu silničních mostů v České republice. V posledních letech se tato informace poměrně často vyskytuje i v médiích a neuplyne měsíc, kdy by se neobjevila reportáž nebo článek o špatném či havarijním stavu některého mostu (případně o počtu mostů v této kategorii apod.).

Údržba mostů se bohužel koná v nedostatečném rozsahu, často z důvodu omezeného rozpočtu správců. Přičemž čištění mostních závěrů, odvodnění nebo včasná výměna nefunkční izolace mohou velmi výrazně prodloužit trvanlivost konstrukce. Opravy mostů jsou prováděny mnohdy neodbornými firmami, kdy je hlavním kritériem pro správce nejnižší cena. Celkově nejde do údržby a oprav mostů dostatek finančních prostředků [59], chybí také kvalifikovaní pracovníci i specializované firmy s odpovídajícím vybavením a zkušenostmi s progresivními způsoby oprav [60]. Výsledkem je, že mosty zařazené do stavebního stavu V až VII tvoří stále téměř 20 % ze všech mostů na pozemních komunikacích (dálnice a silnice I., II. a III. třídy). V nejhorším stupni – havarijním stavu se pak nachází zhruba 100 mostů.

Údržbu železničních mostů má na starost Správa železniční dopravní cesty, s. o. (SŽDC). Stavební stav železničních mostů se rozlišuje do tří stupňů 1 až 3, přičemž nejlepším stupněm 1 bylo v roce 2018 hodnoceno 2,5 tis. mostů, stupněm 2 pak 3,9 tis. a nejhorším stupněm 3 přibližně 360 mostů [61].

Kvalitně odvedenou prací při výstavbě či rekonstrukci mostů lze výrazně oddálit termín další opravy. Zejména dobře provedené hydroizolace a odvodnění mají klíčový vliv na životnost mostů. Kromě finančních prostředků na pravidelnou údržbu a opravy mostů je potřeba hledat nové postupy, kterými by bylo možné celý proces obnovy mostní infrastruktury zefektivnit a zlevnit. Příkladem může být použití přímo pojížděných mostů [62]. V neposlední řadě lze docílit snížení nákladů na opravy mostů pomocí včasné a přesné diagnostiky. Některé jednodušší nedestruktivní metody by si mohli osvojit sami správci mostů, což by jim mohlo pomoci například při plánování údržby. Předpokladem pro to je seznámení správců s vhodnou metodou/metodami alespoň formou metodiky [63].

## 4 METODY A ZAŘÍZENÍ

V této kapitole jsou popsány principy a měřicí technika použitá při měření jak na zkušebním tělese, tak i na betonovém mostě. Na úvod je charakterizována klasická tvrdoměrná zkouška, následují ultrazvuková metoda průchodová a pulse-echo metoda. Poté je popsána funkce georadaru. Na závěr je věnováno nejvíce prostoru infračervené termografii.

### 4.1 TVRDOMĚRNÉ METODY

Tvrdoměrné (sklerometrické) metody patří k základním NDT metodám zkoušení betonových mostů. Jedním z nejpoužívanějších přístrojů pro nedestruktivní zkoušení kvality betonu se stalo tvrdoměrné kladívko Original Schmidt (Schmidtovo kladívko). První model tohoto přístroje zadal do výroby Ing. Ernst Schmidt z Basileje již v roce 1954 u švýcarské firmy Proceq. Od té doby se dostalo do běžné praxe techniků provádějících zkoušení kvality betonu prakticky po celém světě

Odrazové tvrdoměry umožňují nedestruktivně zjišťovat pevnost nebo modul pružnosti betonu nebo hornin. Lze je použít také pro kontrolu rovnoměrné kvality betonu. Tvrdoměry jsou konstruovány s různou energií nárazu podle účelu použití. Základní model Schmidtova tvrdoměru – typ N (obr. 1) slouží k odhadu krychelné pevnosti betonu v rozsahu 10 až 70 MPa.



**Obr. 1:** Schmidtův odrazový tvrdoměr typu N



**Obr. 2:** Silver Schmidt

Schmidtův odrazový tvrdoměr se skládá z ocelového beranu s pružinou, která po uvolnění vymršťuje beran na ocelový razník proti povrchu betonu. Míra odrazu ocelového beranu od ocelového razníku se zjišťuje na přímkové stupnici, která je připojena k zařízení. Velikost odrazu je závislá na tvrdosti betonu. Pomocí přepočtového diagramu sestávajícího ze tří křivek, které odpovídají třem základním směrům rázu, tj. nahoru, dolů, nebo vodorovně – se určuje pevnost v tlaku s nezaručenou přesností  $F_{be}$ .

Novější Silver Schmidt (obr. 2), obsahuje optická čidla, která měří rychlost dopadu a odrazu. Výsledná hodnota  $Q = 100 \cdot (\text{energie obnovená} / \text{energie vstupní})$  je méně závislá na tření a nevyžaduje korekci směru na rozdíl od klasického Schmidtova tvrdoměru. Další výhodou je vnitřní paměť přístroje. Není tedy nutné hodnoty odrazu přepisovat ručně, ale lze je po skončení měření jednoduše zkopírovat do počítače. Tento tvrdoměr lze použít pro betony s pevností od 10 MPa do 100 MPa [64].

Před samotným měřením je v případě potřeby nutné provést přípravu povrchu brusným kamenem. Cílem je obrousit hrubé nebo měkké povrchy nebo povrchy s uvolněnou maltou tak, až jsou hladké a bez uvolněného materiálu. Pokud je povrchová vrstva zkarbonatována, je potřeba ji před měřením odstranit. Zkušební místa se, pokud možno nevolí nad ocelovou výztuží. Při samotném měření se razník tvrdoměru přiloží na zkušební místo kolmo na povrch betonu, přičemž se tvrdoměr stlačuje plynulým pohybem, dokud nedojde k vyvození rázu o energii 2,207 Nm (typ N). Poté se odečte hodnota odrazu a pokračuje se stejným způsobem na dalším zkušebním bodě.

K získání spolehlivého odhadu tvrdosti se na každé zkušební ploše provede nejméně devět platných čtení. Každý zkušební bod musí být vzdálen nejméně 25 mm od sousedního bodu i od hrany konstrukce. Výsledkem zkoušky je střední hodnota ze všech čtení, jestliže se více než 20 % všech čtení liší od střední hodnoty o více než 30 %, pak musí být celá sada čtení zamítnuta [45].

## 4.2 ULTRAZVUKOVÁ IMPULSOVÁ METODA PRŮCHODOVÁ

Ultrazvuková impulsová metoda průchodová slouží ke zkoušení vlastností stavebních materiálů, dílců nebo celých konstrukcí. Principem metody je vysílání mechanických impulsů do zkoumaného prvku prostřednictvím UZ sondy zvané budič. Tyto impulsy se šíří zkoumaným materiálem a po průchodu jsou zaznamenány druhou sondou tzv. snímačem. Obě sondy fungují na principu tzv. piezoelektrického jevu<sup>1</sup>. Běžně užívané sondy ve stavebnictví používají frekvenci 20 až 250 kHz (výjimečně 500 kHz). Obecně platí, že s vyšší frekvencí se zvyšuje rozlišovací frekvence, a tedy i přesnost měření, zároveň však dochází k výraznějšímu útlumu signálu [34, 65].

Na základě změřené doby průchodu signálu  $t$  (s) po dráze  $d$  (m) materiálem měřeného prvku je určena rychlost šíření UZ impulsu ( $\text{m.s}^{-1}$ ):

$$v = d/t \quad (1)$$

Rychlost průchodu impulsu stavebním materiálem je závislá na jeho fyzikálně mechanických vlastnostech a přítomnosti nehomogenit v něm. Z impulsové rychlosti lze stanovit rovnoměrnost betonu, materiálové charakteristiky, jako je modul pružnosti a pevnost betonu v tlaku (pomocí kalibračního vztahu) či změny těchto vlastností v čase.

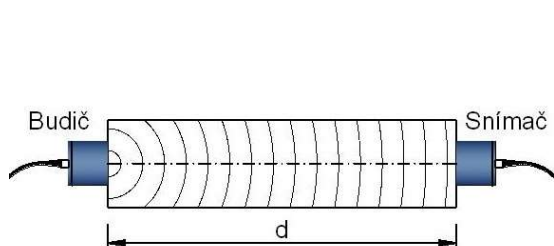
<sup>1</sup> Piezoelektrický jev je schopnost krystalu generovat elektrické napětí při jeho deformaci (snímač). Při obráceném piezoelektrickém jevu dochází k deformaci – vzniku mechanických impulsů pod vlivem elektrického pole (budič).



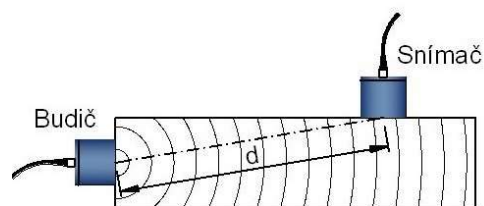
**Obr. 3:** Ultrazvuk Pundit PL-200

Moderní přístroje se skládají z měřicí jednotky, která slouží jako generátor i zesilovač elektrických impulsů (obr. 3). Zároveň měří čas a zaznamenává do své paměti získaná data. K měřicí jednotce jsou připojené dvě sondy, z nichž jedna slouží jako budič a druhá jako snímač UZ impulsů. Podle možnosti přístupu k povrchu zkoušeného objektu rozlišujeme následující typy prozvučování:

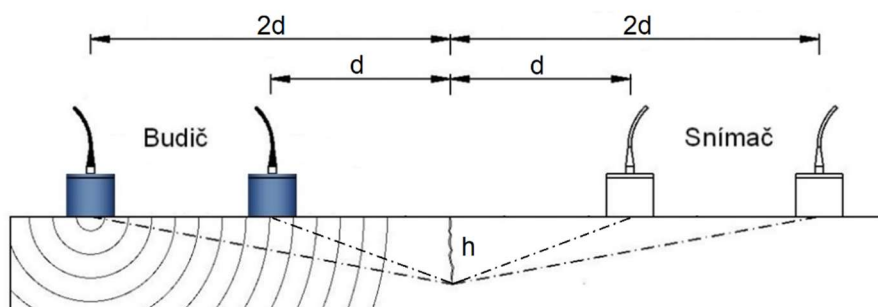
- Přímé (protilehlé) prozvučování (obr. 4) je nejpřesnější a mělo by být zvoleno, pokud je to možné. V případě, že nejsou přístupné obě strany konstrukce, zvolí se jiný typ prozvučování. Pokud je beton vyztužený, dosáhne se nejlepšího výsledku, najde-li se nejprve tato výztuž pomocí elektromagnetické sondy a pak se provede měření mimo ni.
- Polopřímé (šikmé) prozvučování (obr. 5) je jednoduché na použití, ovšem vzdálenost mezi sondami je hůře definovatelná než u přímého prozvučování. Také přesnost je v tomto případě nižší. Polopřímé prozvučování je vhodné použít v situacích, kdy není přístupná protilehlá strana prvku, ale pouze jeho bok (např. u mostních opěr).
- Nepřímé (povrchové) měření lze použít, pokud je přístupná pouze jedna strana konstrukce a zároveň je cílem měření zjištění povrchových trhlin nebo ověření kvality povrchové vrstvy betonu. V opačném případě by se mělo brát v úvahu, že především u starších betonů má povrchová vrstva jiné vlastnosti než hmota uvnitř. Takže měření v tomto uspořádání nemusí vypovídat o celkovém stavu betonového prvku. Při zjišťování hloubky trhliny  $h$  se sondy přiloží ve vzdálenosti  $d$  na obě strany od trhliny a provede se měření, to stejné se zopakuje i ve vzdálenosti  $2d$  od trhliny (obr. 6). Dráhy, po kterých putuje UZ signál, tvoří přepony pomyslných trojúhelníků. Pomocí Pythagorovy věty lze následně dopočítat hloubku trhliny.



Obr. 4: Přímé prozvučování



Obr. 5: Polopřímé prozvučování



Obr. 6: Nepřímé prozvučování – zjišťování hloubky trhlin

Mezi hlavní výhody UZ impulsové metody průchodové patří čistě nedestruktivní charakter zkoušení, opakovatelnost měření a rychlost provedení. Nevýhodou je naopak nutnost přístupu – přiložení sond k oběma koncům měřicí základny (v případě přímého prozvučování), což obvykle nepředstavuje problém u měření laboratorních vzorků, ale u větších prvků mostní konstrukce tato skutečnost vyžaduje nasazení dvoučlenné obsluhy. Existuje několik faktorů, které mají vliv na rychlost šíření UZ impulsů. Při měření je potřeba věnovat pozornost především:

- Zajištění dostatečného akustického kontaktu mezi sondou a povrchem betonu. V praxi se běžně používá například plastelína, vazelína nebo jiné druhy mazadel či vazebních gelů, které se nanášou v tenké vrstvě mezi sondu a beton.
- Boční stěny měřeného prvku mohou nepříznivě odrážet vlnění a způsobovat rušení.
- Přítomnost ocelové výztuže může urychlovat průchod UZ impulsů, pokud měření probíhá ve směru výztuže. Ovšem může také dojít k rušení, případně ke zpomalování vlnění, pokud se výztuž nachází kolmo na směr měření.
- Vlhkost, pórovitost a teplota betonu ovlivňují rychlost UZ až do výše 20 % [66].

### 4.3 METODA PULSE-ECHO

Základem metody pulse echo, je stejně jako u UZ metody průchodové, vysílání mechanických impulzů do zkoumaného prvku. Na rozdíl od ní, však přináší jedno praktické vylepšení, díky kterému je možné provádět měření pouze z jedné strany konstrukce. Metoda pulse-echo je proto určena především k lokalizaci vnitřních vad či rozhraní materiálů. Pulse-echo sonda vysílá prostřednictvím budiče impulsy do

zkoumané konstrukce, narazí-li impuls při svém prostupu materiálem na hranici mezi dvěma prostředími s různou akustickou impedancí, dochází k jeho částečnému odrazu zpět. Na povrchu je pak odražený impuls zaznamenán prostřednictvím snímače. Z naměřeného času průchodu signálu a rychlosti šíření impulzu v materiálu stanovené při kalibračním měření lze určit hloubky vnitřních rozhraní. Akustické vlny mohou, na rozdíl od elektromagnetických, prostupovat kovem. Díky tomu lze do určité míry kontrolovat i zainjektování kabelových kanálků [38].

Jako příklad lze uvést přístroj Pundit PL-200PE (obr. 7) od švýcarského výrobce Proceq. Měřicí zařízení se skládá z jednotky s dotykovým displejem a maticové sondy, která obsahuje 9 budičů a stejný počet snímačů. Každý jednotlivý budič/snímač má vlastní nezávislý přítlak, díky čemuž je zaručen dokonalý kontakt s měřeným povrchem, lze tak provádět měření i na hrubém betonu. Na rozdíl od průchodových sond není při měření potřeba používat vazebné prostředky.

Hlavní aplikace této metody je měření tloušťky betonových prvků a lokalizace dutin. Sonda umožňuje změření rychlosti příčných vln, kalibraci a následné přesné stanovení tloušťky stěny až do hloubky 1 m. Pro rychlé určení tloušťky desky lze použít jednoduchý bodový sken (A-sken). U složitějších objektů, obsahujících vnitřní defekty, výztuž či kanálky s předpínací výztuží se doporučuje provést alespoň liniový sken (B-sken), složený z několika bodových skenů za sebou. Poslední možností je plošný sken (C-sken), který lze získat složením několika liniových skenů vedle sebe a umožňuje názornou vizualizaci prvku s případnými podpovrchovými nehomogenitami.



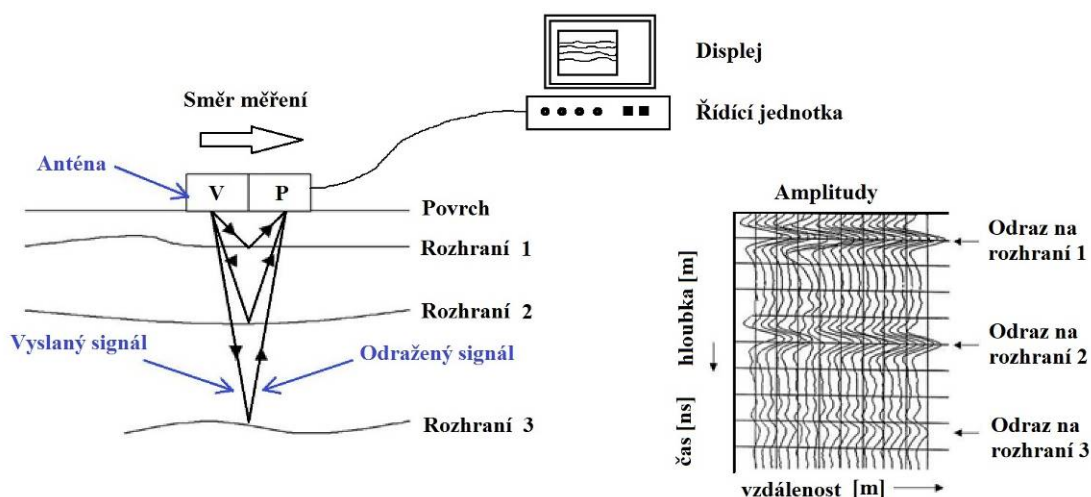
**Obr. 7:** Ultrazvukový pulse-echo přístroj Pundit PL-200PE; detail sondy (vpravo): 9x budič a 9x přijímač



## 4.4 GEORADAR

Georadar, někdy též známý pod zkratkou GPR (Ground Penetrating Radar), je měřicí zařízení založené na principu vysílání vysokofrekvenčních elektromagnetických (EM) impulzů do zkoumaného prostředí a následné registraci jejich zpětných odrazů.

Vysílací anténa umístěná na povrchu generuje impulzy a posílá je do zkoumané konstrukce. Pokud se v prostředí pod povrchem nachází nějaká diskontinuita, dochází k částečnému odrazení impulzu zpět k povrchu, kde je tento signál zachycen přijímací anténou (obr. 8). Diskontinuita může být rozhraní mezi dvěma vrstvami s různými dielektrickými vlastnostmi, dutina nebo delaminace. Schopnost signálu odrážet se, závisí na elektromagnetických vlastnostech sousedních materiálů. Čím více se liší relativní permitivity (dříve označované jako dielektrické konstanty) obou materiálů, tím lépe se signál od rozhraní odráží a měření je tedy snáze realizovatelné. Pomocí georadaru lze tedy snadno nahlédnout pod povrch všech nekovových materiálů a zjistit vnitřní variabilitu struktury. Velmi dobře lze také použít georadar k vyhledání kovové výztuže v betonu.



**Obr. 8:** Princip měření georadarem, vpravo: radarogram

Při měření georadarem je důležitý pohyb anténou, během něhož anténa vysílá opakovaně signál do zkoumané konstrukce. Intenzita odražené vlny je zaznamenávána v diskrétních časových okamžicích. Výsledný záznam měření se nazývá radarogram. Osa x obvykle odpovídá vzdálenosti, osa y představuje čas průchodu elektromagnetického signálu prostředím, následně je tento čas převeden na hloubku, je-li známa rychlost šíření signálu v materiálu. Čas průchodu EM signálu prostředím se přepočítává na tloušťku podle vztahu:

$$h = v \cdot \frac{t}{2} \quad (2)$$

pro rychlost šíření EM signálu platí:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3)$$

po sloučení obou rovnic:

$$h = \frac{ct}{2\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (4)$$

kde:

- $h$  – tloušťka vrstvy (m)
- $v$  – rychlost šíření EM signálu prostředím ( $\text{m} \cdot \text{ns}^{-1}$ )
- $t$  – čas průchodu signálu vrstvou – tam a zpět (ns)
- $c$  – rychlost světla ve vakuu ( $2,997 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
- $\varepsilon_r$  – relativní permitivita prostředí (-)

Výrobci georadarů nabízí různé druhy antén pracujících na frekvencích od 10 MHz až po 10 GHz. Použitím nízkofrekvenčních antén lze provádět měření ve větších hloubkách, ovšem s nižším rozlišením. Naopak vysokofrekvenční antény umožňují měřit ve vysokém rozlišení, ale s nižším hloubkovým dosahem. Pro inspekce betonových konstrukcí se běžně používají antény s centrální vysílací frekvencí nad 1 GHz. Vertikální rozlišení antény lze pro daný materiál určit pomocí vzorce:

$$V_r = \frac{T_{pulse}c}{2\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (5)$$

kde:

- $V_r$  – vertikální rozlišení (m)
- $T_{pulse}$  – perioda pulzu (s)

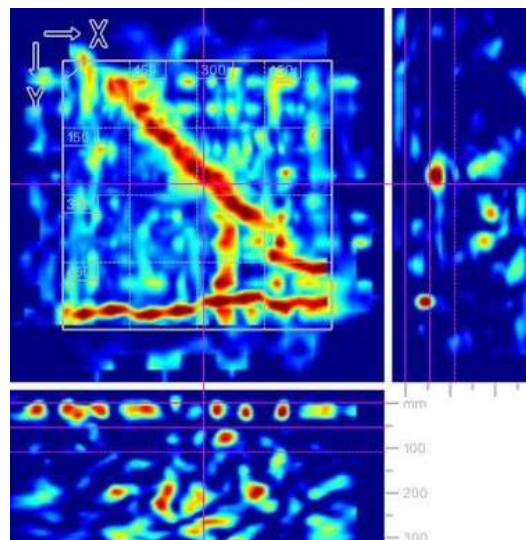
V posledních letech se na trh dostávají nové moderní přístroje, které jsou mnohem více uživatelsky přívětivé než předchozí generace georadarů. Na rozdíl od schématu, zobrazeném na obr. 8, se jedná o zařízení, které zahrnují řídicí jednotku, anténu, baterii a někdy i displej v jednom kompaktním přístroji. Odpadá tak nutnost propojovat jednotlivé prvky systému pomocí kabelů, díky čemuž je měření mnohem flexibilnější.

Tyto kompaktní přístroje jsou určeny především pro jednoduchou a rychlou lokalizaci výztuže v betonu. Lze jimi provádět jak liniové, tak i plošné skeny s automatickým vyhodnocením polohy výztuže. Ke zjednodušení měření se na povrch konstrukce lepí šablony s vyznačeným rastrem pojezdů ve dvou na sebe kolmých směrech (obr. 9). Zjištěnou výztuž si lze následně prohlédnout v půdorysném skenu (obr. 10), v řezech či ve 3D zobrazení. Pokud nedosahuje hustota vyztužení příliš vysokých hodnot, lze lokalizovat i polohu druhé vrstvy výztuže. Georadar se však nehodí k určování průměru výztuže [68].





**Obr. 9:** Měření s GPR přístrojem Hilti PS 1000 s pomocí rastru 1200 × 1200 mm [67]



**Obr. 10:** Georadarový sken polohy smyková výztuže v trámu mostu [68]

## 4.5 INFRAČERVENÁ TERMOGRAFIE

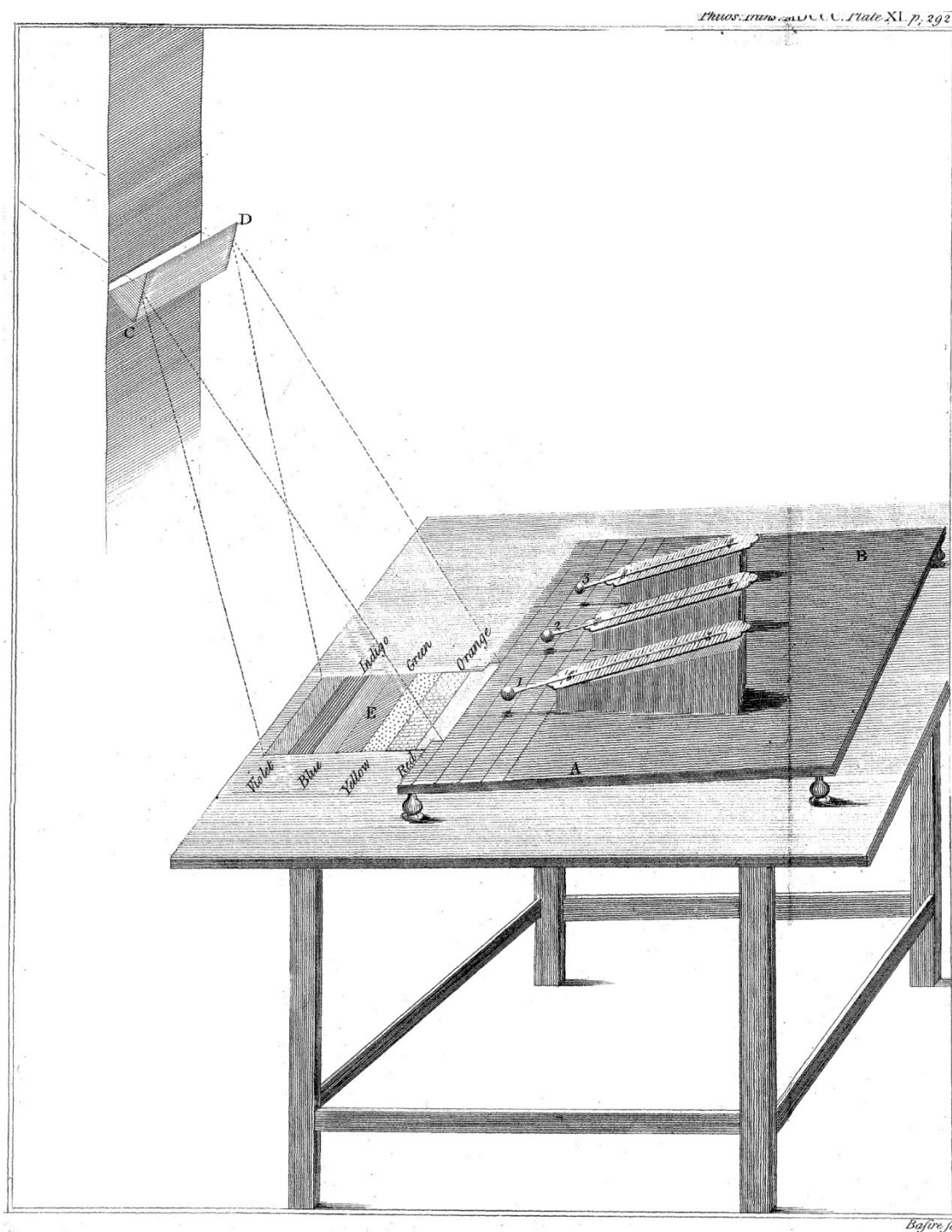
Infračervená termografie je založená na detekci záření objektů v infračerveném (dále také IR) spektru vlnových délek. Takto září všechna tělesa, jejichž teplota je vyšší než absolutní nula. Zařízení, které detekuje a skládá 2D obraz IR záření se obecně nazývá infračervená kamera, nebo infračervená termografická kamera, zkráceně termokamera. Výsledkem záznamu termokamery je obraz odpovídající intenzitě tepelného vyzařování snímaného objektu. Tento záznam se nazývá termogram. Intenzita tepelného záření objektů přitom přímo souvisí s jejich teplotou. Termogram je proto obrazem rozložení povrchové teploty tělesa a IR termografie se nejčastěji využívá k bezkontaktnímu měření prostorového a časového rozložení teplotních polí.

### 4.5.1 Historie infračervené technologie

Počátky ve zkoumání infračerveného záření sahají až do roku 1800, kdy britský astronom sir William Herschel (původním jménem Friedrich Wilhelm Herschel) objevil tepelné záření nacházející se za červenou barvou viditelného spektra (odtud název infra-červený). Herschel objevil infračervené záření tak, že rozložil sluneční paprsek pomocí krystalu a rtuťovými teploměry měřil teploty jednotlivých barev (obr. 9). Herschel zjistil, že se teplota rapidně zvýší, když přejde z červeného světla do oblasti pod ní, kterou nazval „temné záření“. Temné záření byla oblast elektromagnetického spektra dnes známá jako oblast infračerveného záření. Herschel zjistil, že toto nové záření má podobné vlastnosti jako viditelné – odráží se, láme, je vyzařováno i pohlcováno [69–71]. Zpočátku panoval skepticismus ohledně tohoto „neviditelného světla“, kvůli existenci mnoha protikladných představ o povaze světelných, tepelných a chemických zářeních [72].

Dvacet let poté německý fyzik Thomas Johann Seebeck objevil termoelektrický jev [73]. Seebeck náhodně zjistil, že existuje elektrické napětí mezi dvěma konci kovové

tyče, pokud mezi těmito konci existuje teplotní gradient  $\Delta T$ . V roce 1829 vytvořil italský fyzik Leopold Nobili první termočlánek, s jeho vylepšením mu následně pomohl jeho přítel Macedonio Melloni. Toto zařízení bylo minimálně 40krát citlivější než nejlepší dostupný teploměr a mohlo detekovat teplotu těla na vzdálenost 30 stop [74]. Díky své vysoké citlivosti se tento přístroj stal nejrozšířenějším detektorem infračerveného záření pro příští půlstoletí [75].



**Obr. 11:** *Herschelův pokus s rozkladem slunečních paprsků [71]*

V roce 1840 použil syn sira Williama Herschela sir John Herschel evapograf k vytvoření prvního infračerveného snímku. Teplotní obraz vznikl díky rozdílnému odpařování tenké vrstvy oleje a dal se prohlédnout při nasvícení olejového povlaku světlem [76]. V roce 1860 Gustav Kirchhoff představil koncept absolutně černého tělesa<sup>2</sup> [77]. Slovinec Jožef Stefan v roce 1879 experimentálně zjistil, že černé těleso emituje množství energie přímo úměrné čtvrté mocnině své absolutní teploty [78]. V roce 1884 byl rakouským vědcem Ludwigem Boltzmannem teoreticky odvozen tzv. Stefanův-Boltzmannův zákon:

$$I = \sigma T^4 \quad (6)$$

který je zjednodušením rovnice:

$$I = \frac{2\pi^5}{15} \cdot \frac{k_b^4}{c^2 h^3} \cdot T^4 \quad (7)$$

kde:

$I$  – celková intenzita záření ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )

$\sigma$  – Stefanova-Boltzmannova konstanta ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ )

$T$  – termodynamická teplota (K)

$c$  – rychlost světla ve vakuu ( $2,997 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$k_b$  – Boltzmannova konstanta ( $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ )

$h$  – Planckova konstanta ( $6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ )

Mezitím skotský fyzik James Clerk Maxwell předpověděl teoretickou existenci elektromagnetických vln a zjistil, že světlo je také elektromagnetické vlnění. V roce 1887 německý fyzik Heinrich Rudolf Hertz potvrdil Maxwellovu hypotézu a zjistil, že i ostatní elektromagnetické vlny, stejně jako světelné vlny, se odráží, lámou a co je nejdůležitější, šíří se stejnou rychlostí světla, ale liší se vlnovou délkou.

V roce 1880 dosáhl americký astronom Samuel Langley významný průlom díky vynálezu bolometru, který zásadně zlepšil citlivost při měření IR záření [79]. To umožnilo zkoumání slunečního záření v oblasti IR spektra a měření jeho intenzity na různých vlnových délkách. Místo napětového rozdílu pracuje bolometr na principu změny elektrického odporu v závislosti na teplotě. Langley pokračoval ve vylepšování bolometru po dobu dalších dvaceti let a podařilo se mu dosáhnout 400násobného zvýšení citlivosti ve srovnání s původní verzí bolometru. Jeho poslední bolometr byl schopen detekovat teplo z krávy na vzdálenost čtvrt míle [80].

Na konci 19. století byly známy různé druhy záření elektromagnetického spektra a bylo provedeno mnoho pokusů pro odvození základních zákonů týkajících se infračerveného záření. Na začátku 20. století dva britští vědci: John William Strutt,

---

<sup>2</sup> Absolutně černé těleso je ideální těleso, které pohlcuje veškeré záření všech vlnových délek, dopadající na jeho povrch. Absolutně černé těleso je současně ideální zářič, ze všech možných těles o stejné teplotě vysílá největší možné množství zářivé energie.

známý jako lord Rayleigh a sir James Hopwood Jeans stanovili tzv. Rayleighův-Jeansův zákon:

$$I_{\lambda b} = 8\pi k_b \frac{T}{\lambda^4} \quad (8)$$

kde:

$I_{\lambda b}$  – monochromatická intenzita záření absolutně černého tělesa ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )

$\lambda$  – zkoumaná vlnová délka záření (m)

$T$  – teplota absolutně černého tělesa (K)

Tento zákon byl odvozen z argumentů klasické fyziky a je v souladu s experimentálním měřením provedeným pro dlouhé vlnové délky. Z rovnice ovšem vyplývá, že s klesající vlnovou délkou by spektrální intenzita vyzařování měla růst do nekonečna. Zásadní nesoulad s experimentem se objevuje od oblasti ultrafialového záření a pochází odtud i pojem tzv. „ultrafialové katastrofy“. Ultrafialová katastrofa a další problémy nalezené v té době ukázaly na nepoužitelnost klasické fyziky pro popis některých jevů a vedly ke zrodu kvantové fyziky.

Zakladatelem kvantové teorie je německý vědec Max Planck, který v roce 1900 odvodil vyzařovací zákon na základě předpokladu, že je energie vyzařována nespojitě po kvantech [81]. Ze zákona vyplývá, že záření nemůže mít libovolnou energii. Energie je jakoby naporcována – vždy je násobkem určitého minimálního množství neboli kvanta. Toto základní kvantum energie je závislé na vlnové délce (frekvenci) záření. Krátkovlnné záření má větší základní kvantum energie, dlouhovlnné menší. Planckův vyřazovací zákon přesně popisuje spektrální rozložení záření černého tělesa:

$$I_b = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda k_b T} - 1)} \quad (9)$$

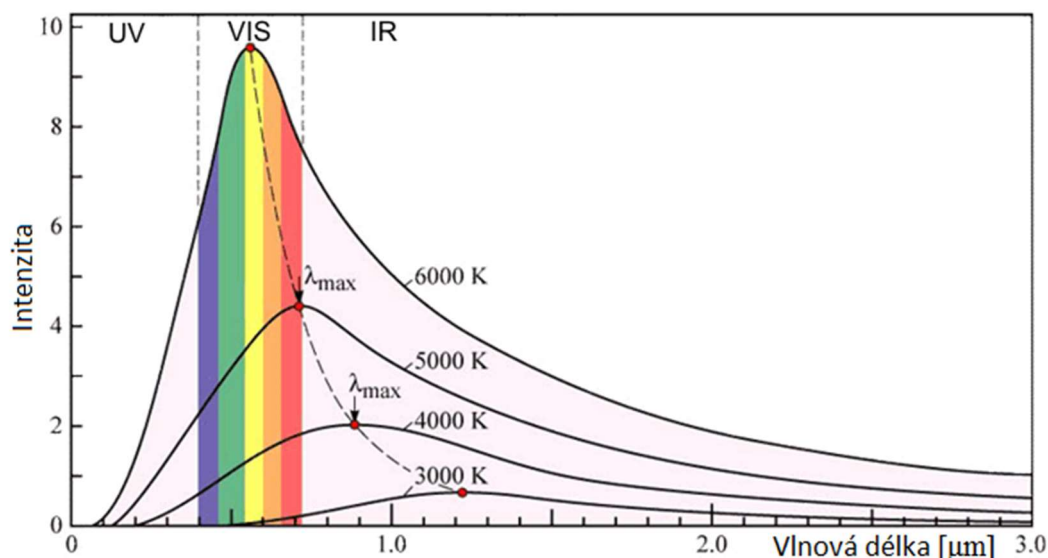
Planckův vyzařovací zákon je graficky zobrazen na obr. 12 pro několik hodnot absolutní teploty. Každé absolutní teplotě odpovídá křivka podle vztahu (9). Pro každou křivku platí, že  $I_{\lambda b}$  se rovná nule pro  $\lambda = 0$ . Poté křivky strmě stoupají na maximum a následně pozvolna klesají k nule ve velmi dlouhých vlnových délkách. Jak lze vidět na obrázku, maximální energie absolutně černého tělesa je vyzařována na vlnové délce ( $\lambda_{max}$ ), která se s rostoucí termodynamickou teplotou snižuje (tj. čím teplejší je těleso, tím vyzařuje na kratších vlnových délkách, tj. vyšších frekvencích). Tento jev popisuje tzv. Wienův posunovací zákon:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} \quad (10)$$

kde:

$\lambda_{max}$  – vlnová délka maxima spektrální hustoty vyzařování

$b$  – Wienova konstanta ( $2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ )



**Obr. 12:** Závislost spektrální hustoty vyzařování absolutně černého tělesa na vlnové délce [82]

První IR fotografický detektor vytvořil Theodor W. Case v roce 1917 [83]. Kamera citlivá na infračervené záření byla vynalezena v roce 1929 maďarským fyzikem Kálmánem Tihanyiem pro britskou protiletectkou obranu [84]. Mezi světovými válkami bylo dosaženo značného pokroku ve vývoji detektorů záření a převodníků obrazu, zároveň se infračervená spektroskopie stala jednou z nejvýznamnějších technik chemické analýzy. Němečtí vědci zjistili, že ochlazením fotodetektoru se zvýší jeho celkový výkon. Další vývoj IR technologie byl poháněn především díky vojenskému průmyslu po druhé světové válce. Ve druhé polovině 50. let vyvinula společnost Texas Instrument ve spolupráci s americkou armádou první jednoprvkový detektor umožňující snímání scén a produkování řádkových obrazů.

První komerční infračervené kamery se objevily na konci 60. let 20. století. Tyto systémy byly v porovnání s dnešními termokamerami neskladné, pomalé a s malým rozlišením. Další rozvoj měřicí techniky umožnil, že se od 80. let 20. století začaly termokamery hojně používat v medicíně, pásové výrobě, ke kontrole budov a v dalších aplikacích.

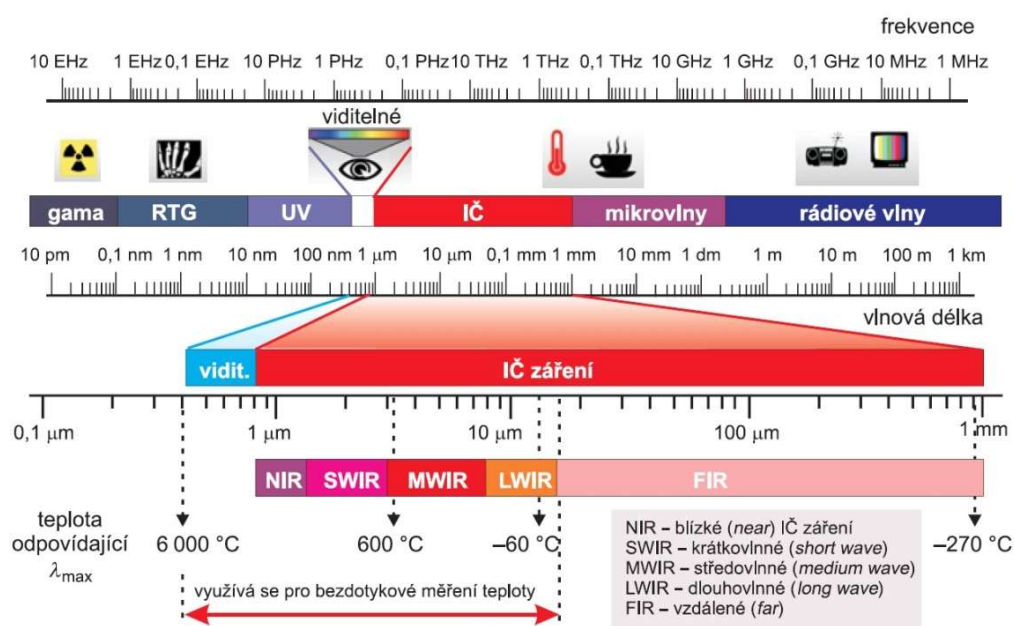
Postupem času bylo armádou spojených států uvolněno pro komerční použití zařízení známé jako maticový detektor. Díky tomu se na trh během 90. let 20. století dostala nová generace termokamer. Tyto nové přístroje umožňují souběžné měření teplot na různých místech zorného pole a nevyžadují kryogenní chladicí systém.

Za posledních dvacet let prodělal vývoj v oblasti termokamer velký pokrok. V současné době například dokáže kvalitní termokamera o rozlišení  $640 \times 480$  pixelů provést v jediném okamžiku 307 200 nezávislých měření. Běžnou součástí je zabudovaný displej. Zařízení mají mnoho automatických funkcí, které usnadňují měření, zvyšuje se teplotní citlivost a celkově se zlepšuje kvalita termogramů.

## 4.5.2 Infračervené záření

Elektromagnetické záření vyzařované objektem souvisí s jeho povrchovou teplotou. Teplota odpovídá míře vnitřní energie objektu, tj. energii pohybu atomů a molekul, z nichž se předmět skládá. Každý objekt o teplotě  $T$  nad absolutní nulou vyzařuje elektromagnetické záření ve formě paprsků nacházejících se infračervené části elektromagnetického spektra.

Elektromagnetické spektrum (obr. 13) je rozděleno do několika oblastí vlnové délky, které se nazývají pásma. Infračervené spektrální pásmo, které odpovídá vlnové délce od 780 nm do 1 mm, se nachází mezi rádiovými vlnami a viditelným spektrem.



**Obr. 13:** Rozsah spektra infračerveného záření využívaného při měření [85]

Množství tepelného záření, které je z povrchu objektu vyzářeno, závisí nejen na jeho teplotě, ale i na emisivitě. Emisivita je tak v jistém smyslu efektivita vyzařování. Čím je emisivita vyšší a blíže 1, tím více tepelného záření povrch při dané teplotě vyzáří. Při emisivitě rovné 1 vyzáří povrch maximální množství tepelného záření, které je z fyzikálního hlediska možné vyzářit při dané povrchové teplotě černého tělesa. Tuto hodnotu emisivity má však pouze „ideální“ černé těleso a v praxi nejsme schopni této hodnoty dosáhnout.

Běžné stavební materiály, jako je beton, mají hodnotu emisivity přibližně 0,95 viz. tabulka 1. Teplotu těchto materiálů tak lze pomocí termokamery dobře změřit. Naopak lesklé kovy mají emisivitu výrazně nižší a chovají se jako tzv. „IR zrcadla“ - většina IR záření přicházejícího do objektivu termokamery je pouze odraz okolního záření od zkoumaného předmětu a samotné IR záření tohoto předmětu tvoří jen menší část. Zjištění teploty těchto kovových materiálů je proto prostřednictvím termokamery komplikované a pro její úspěšné změření je vhodné provést úpravu kovového povrchu pomocí speciálního laku nebo lepicí pásky.

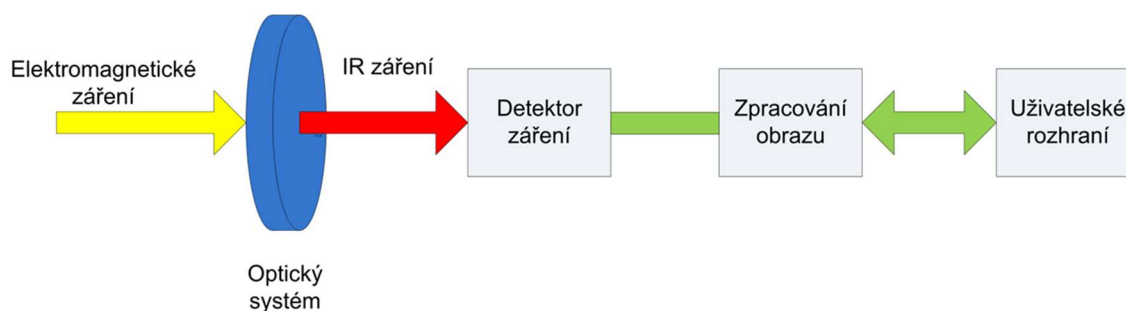


**Tabulka 1:** Hodnoty emisivit vybraných materiálů

Materiál	Emisivita	Materiál	Emisivita
Beton, hrubý	0,92 – 0,97	Hliník, leštěný	0,05 – 0,10
Beton, hladký	0,85	Hliník, zoxidovaný	0,10 – 0,40
Omítka	0,90	Ocel, neoxidovaná	0,10
Dřevo	0,80 - 0,95	Ocel, zoxidovaná	0,70 – 0,95
Voda	0,90 – 0,95	Asfaltová vozovka	0,93
Led	0,95 – 1,00	Barva na kov	0,60 – 0,90

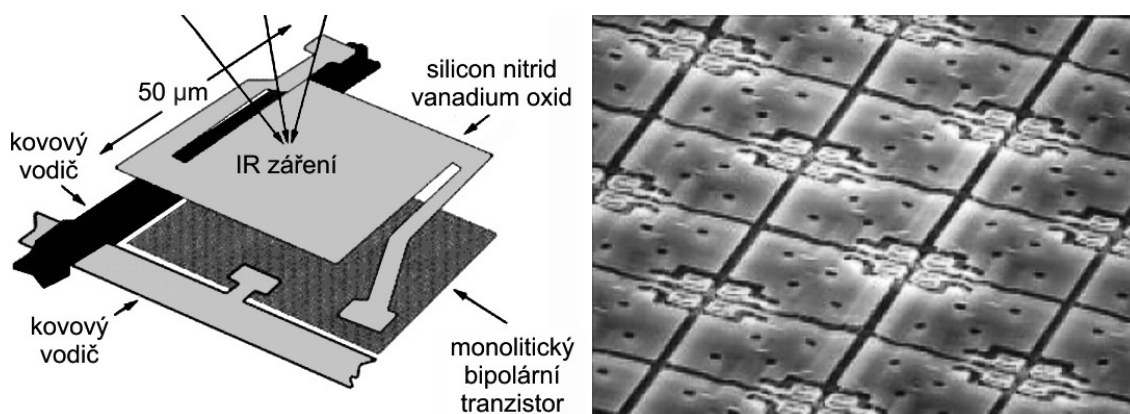
### 4.5.3 Konstrukce termokamery

Díky blízkosti viditelného a IČ záření je i konstrukce moderních termokamer velmi podobná konstrukci klasických kamer či fotoaparátů. Nejčastěji používané termokamery pracují v rozsahu 8–14  $\mu\text{m}$  vlnové délky, který odpovídá záření emitovaném objekty při běžné teplotě. Objektiv termokamery promítá dopadající IČ záření na tzv. detektor záření, který měří jeho intenzitu (obr. 14). Tyto informace jsou následně digitalizovány a převedeny na výsledný snímek, tzv. termogram.

**Obr. 14:** Blokové schéma termokamery [86]

Jako optika slouží v současné době téměř výhradně spojky z germania, které fungují zároveň i jako filtr (tj. selektují část elektromagnetického spektra důležitého pro měření). Běžné termokamery nemají na rozdíl od digitálních fotoaparátů optický zoom, proto je potřeba se spokojit se základním zorným polem. U některých modelů je však možné v případě potřeby použít výměnný objektiv. Například při měření mostů z větší vzdálenosti je vhodné použít teleobjektiv. Levnější termokamery neobsahují automatické ostření, proto je potřeba věnovat správnému ručnímu zaostření zvýšenou pozornost. Špatně zaostřený termogram je pro následné vyhodnocení nepoužitelný.

Existují dva základní typy detektorů IR záření: fotonový a tepelný (někdy se také používá označení chlazený a nechlazený). Klíčovým prvkem tepelného detektoru je tzv. mikrobolometrické pole, které se skládá z řady malých detektorů – mikrobolometrů (obr. 15). Mikrobolometr funguje na principu změny elektrického odporu v závislosti na intenzitě dopadajícího záření, jehož vlivem se zahřívá. Každý jednotlivý mikrobolometr představuje vlastně jeden pixel výsledného termogramu.



**Obr. 15:** Schéma mikrobolometru (vlevo); snímek z elektronového mikroskopu zachycující rozmístění bolometrů do mikrobolometrického pole (vpravo) [87]

Naopak fotonové detektory pracují na principu počítání fotonů, tj. kvant elektromagnetického záření. Jsou citlivější než tepelné detektory, vyžadují ovšem chlazení. Z tohoto důvodu jsou i termokamery s fotonovým detektorem těžší a zpravidla i objemnější než termokamery s tepelným detektorem. Pro měření mostních konstrukcí si lze vystačit s nechlazenými termokamerami s tepelným detektorem (obr. 16), které jsou i cenově dostupnější.



**Obr. 16:** Nechlazená termokamera FLIR T640 [88]



**Obr. 17:** Chlazená termokamera InfraTec ImageIR 10300 [89]

Manipulace s ručními termokamerami je poměrně jednoduchá, ovládání je až na několik detailů hodně podobné digitálním fotoaparátům. Hlavní parametr ovlivňující kvalitu a cenu termokamer je rozlišení detektoru. V současné době jsou na trhu základní modely termokamer (s tepelným detektorem) s rozlišením  $80 \times 60$  pixelů až po profesionální termokamery s rozlišením pohybujícím se okolo jednoho megapixelu. Špičkové termokamery s fotonovým detektorem (obr. 17) dosahují ještě vyšších rozlišení, jejich ceny ovšem překračují milion korun. V tabulce 2 je uveden přehled několika vybraných modelů termokamer s tepelným detektorem spadajících do vyšší a profesionální třídy.

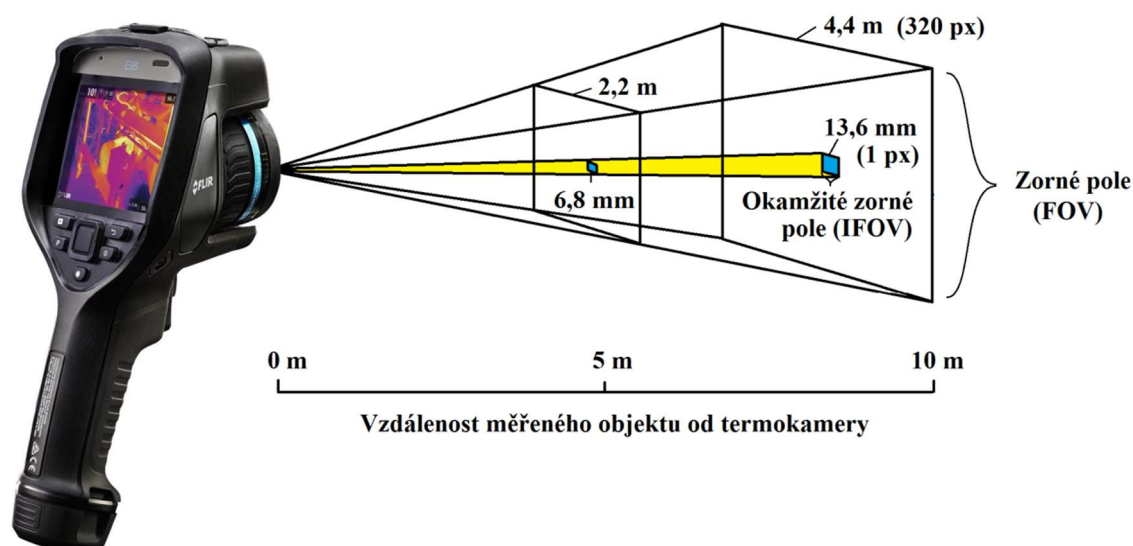


**Tabulka 2:** Parametry vybraných modelů nechlazených termokamer (údaje z 05/2019)

Výrobce	Model	Rozlišení detektoru	Teplotní citlivost	Teplotní rozsah	Zorné pole
FLIR	E75	320 × 240 px	<0,030 °C	-20 až 650 °C	42° × 32°
	T540	464 × 348 px	<0,040 °C	-20 až 1500 °C	24° × 18°
	T660	640 × 480 px	<0,020 °C	-40 až 2000 °C	25° × 19°
	T1K	1024 × 768 px	<0,020 °C	-40 až 2000 °C	28° × 21°
FLUKE	Ti450 PRO	320 × 240 px	<0,025 °C	-10 až 1500 °C	24° × 17°
	Ti480 PRO	640 × 480 px	<0,050 °C	-10 až 800 °C	34° × 24°
	TiX520	320 × 240 px	<0,050 °C	-20 až 850 °C	24° × 17°
	TiX580	640 × 480 px	<0,050 °C	-20 až 800 °C	34° × 24°
TESTO	875	160 × 120 px	<0,050 °C	-20 až 550 °C	32° × 23°
	882	320 × 240 px	<0,050 °C	-20 až 350 °C	32° × 23°
	885	320 × 240 px	<0,030 °C	-20 až 350 °C	30° × 24°
	890	640 × 480 px	<0,040 °C	-30 až 350 °C	42° × 32°

Další důležitá vlastnost, která je podstatná především při hledání teplotních kontrastů na povrchu objektů, je dostatečná teplotní citlivost. Z tabulky je zřejmé, že většina nechlazených termokamer již dnes dosahuje teplotní citlivosti <0,05°C. Pro některé průmyslové aplikace je důležitý dostatečně velký teplotní rozsah termokamery. Při měření mostů se však zpravidla nesetkáváme s teplotami, se kterými by si běžná termokamera neuměla poradit, proto je pro tuto aplikaci naprosto dostatečný základní teplotní rozsah pokrývající běžné teploty.

Z velikosti rozlišení detektoru termokamery a zorného pole (FOV) objektivu lze určit geometrické rozlišení termokamery. Například pro termokameru FLIR E60bx, která byla používána při měření, lze určit okamžité zorné pole (IFOV) jednoduchým výpočtem:  $25^\circ/320 \text{ px} \cdot \pi/180^\circ = 1,36 \text{ mrad}$  (kde hodnota 25° odpovídá šířce zorného pole použité termokamery o rozlišení 320 × 240 pixelů). Vynásobením výsledné hodnoty vzdáleností termokamery od měřeného objektu lze stanovit délku strany pomyslného čtverce na povrchu objektu, který odpovídá jednomu pixelu termogramu. V případě zmíněné termokamery a vzdálenosti 10 metrů vychází tento rozměr na 13,6 mm a představuje tak nejmenší oblast na povrchu objektu, kterou lze teoreticky změřit (obr. 18). Protože jedno-pixelové měření může být z řady důvodů nepřesné, doporučuje se pro přesné měření, aby nejmenší měřená oblast zabírala plochu alespoň 3 × 3 pixely. V našem případě tomuto rozlišení odpovídá čtverec na povrchu měřeného objektu o hraně 4 cm. Proto je potřeba volit vhodnou vzdálenost, ze které bude prováděno měření, případně použít teleobjektiv nebo termokameru s větším rozlišením.



*Obr. 18: Rozlišení termokamery – zorné pole a okamžité zorné pole*

#### 4.5.4 Termogram

Termogram, nebo termovizní snímek, resp. infračervený snímek je obraz pořízený termokamerou. Protože IR záření není pro lidské oko viditelné, vizualizují se termovizní snímky za použití okem viditelných palet, v nichž je pro každou barvu přiřazena určitá teplota dle aktuálně zvoleného teplotního rozpětí. Toto rozpětí volí termokamera automaticky nebo ho může uživatel zvolit manuálně při měření, případně až během následné úpravy termogramů např. v počítači. Teploty, které jsou mimo zvolený rozsah, se na termogramu objeví jako jednotné mezní barvy.

Termovizní snímky mohou být radiometrické a neradiometrické (pouze zobrazující). Radiometrické termovizní systémy umožňují vypočítat teplotu na povrchu tělesa. Základem pro výpočet je množství snímaného infračerveného zářivého toku. V plně radiometrickém termogramu lze provádět měření teplot a upravit parametry snímku i po jeho uložení [90].

#### 4.5.5 Termografické postupy

Termografické postupy lze rozdělit na kvalitativní a kvantitativní. Podle způsobu, jakým se provádí měření, lze také rozlišovat termografii pasivní nebo aktivní.

Cílem kvantitativní termografie je přesné stanovení hodnot teploty měřených objektů nebo jejich částí. V tomto případě je nezbytná znalost optických vlastností měřených objektů, často v závislosti na teplotě a je potřeba hodnotit vliv okolí na měřené hodnoty. Mezi významné aplikace kvantitativní termografie patří např. kontrola teplot při tepelném zpracování.

Kvalitativní termografie obecně nevyžaduje přesné měření teplot v absolutních hodnotách. Vyhodnocují se zejména teplotní rozdíly a kontrasty v IR vyzařování mezi různými místy jednoho měřeného objektu. Ve stavební termo-diagnostice se ve většině

případů používá právě kvalitativní termografie, podobně jako při termografickém zkoušení betonových mostů.

Oba přístupy, kvalitativní i kvantitativní, mohou být aplikovány ve smyslu pasivní nebo aktivní termografie. Na měřený objekt může být uměle aplikováno vybuzení externím zdrojem, které způsobí vznik teplotních kontrastů spojených s materiálovými nehomogenitami nebo výskytem vad v materiálu. V takovém případě se jedná o aktivní termografii. Aktivní termografie je významnou technikou při zjišťování defektů materiálů a nachází uplatnění zejména ve strojírenském a leteckém průmyslu.

Pokud se při měření uměle neovlivňuje teplota objektu a měří se tedy její přirozená teplota nebo přirozeně vzniklé teplotní kontrasty, jedná se o pasivní termografii. Vzhledem k velikostem staveb dopravní infrastruktury nepřichází aktivní termografie ve většině případů v úvahu, a proto se při měření těchto objektů uplatňuje právě pasivní termografie.

## 5 HODNOCENÍ STAVU MOSTŮ

Hodnocení stavu mostů je komplexní činnost, při které je potřeba shromáždit maximum informací o konstrukci mostu. Prvním krokem je sběr podkladů a informací o historii konstrukce. Další součástí jsou prohlídky mostů (běžné, hlavní, mimořádné), jež přinášejí základní informace o stavu mostů. Na základě výsledku prohlídky může být doporučena oprava mostu případně diagnostický průzkum mostu pro přesnější stanovení stavu mostu a jednotlivých částí konstrukce. Součástí diagnostického průzkumu může být i zatěžovací zkouška a následný statický výpočet. Všechny tyto kroky slouží jako podklad pro stanovení následných opatření a/nebo k určení rozsahu opravy/rekonstrukce mostu [41].

### 5.1 PROHLÍDKY MOSTŮ

Stav mostů je kontrolován v pravidelných intervalech v rámci prohlídek mostních objektů. Při provádění prohlídek mostů se postupuje podle ČSN 73 6221 [42], kterou dále doplňuje a rozšiřuje příloha „A“ TP 175 [91]. V rámci stanovení životnosti mostů je nutné se při prohlídkách zaměřit na nejčastější závady nosné konstrukce a spodní stavby, kterou je podle statistických hodnocení především koroze výztuže. Koroze výztuže je v našich podmínkách obvykle způsobena ztrátou ochranných vlastností krycí betonové vrstvy vlivem karbonatace, pronikáním chloridů používaných při zimní údržbě, a především zatékáním vody k výztuži. Při provádění prohlídek u betonových mostů je třeba se zaměřit především na závady typu:

- zatékání do nosné konstrukce a na spodní stavbu;
- zatékání do dutin nosné konstrukce a způsob jejich odvodnění;
- povrchová nebo hloubková degradace betonu, oslabení tlačných betonových částí;
- nedostatečná tloušťka krycí betonové vrstvy;
- odpadávání krycí betonové vrstvy, trhliny v místech začínající koroze výztuže;
- stopy po zatékání do kabelových kanálků předpínací výztuže;
- zatékání do kotev a na dobetonování čel nosné konstrukce;
- koroze výztuže, případně její oslabení;
- projevy alkalické reakce kameniva v místech zatékání;
- výskyt trhlin, především staticky významné trhliny;
- nadměrné průhyby a deformace, výrazné kmitání konstrukce při přejezdu vozidel;
- funkčnost mostních dilatačních závěrů;
- stav ložisek a jejich nastavení;
- stav odvodňovacího systému;
- ověření stavu základů;
- stabilita svahů zemního tělesa u krajních opěr.

O provedené prohlídce se vede záznam v tištěné i v digitální podobě. Data jsou následně naimportována do online databáze označované jako Systém hospodaření s mosty (BMS). Provádět změny v této databázi mohou pouze osoby s příslušným oprávněním, standardně to jsou správci mostů, příslušní zaměstnanci ŘSD, technici provádějící prohlídky mostů apod. Součástí záznamu je vždy fotodokumentace zjištěných závad. Také nesmí chybět boční pohledy na celý most (z obou stran), pohled ve směru staničení na prostorové uspořádání na mostě, čelní pohledy na jednotlivé podpěry, pohledy na křídla krajních opěr, mostní ložiska, závěry a podhledy nosné konstrukce. Na základě mostních prohlídek nebo výsledků diagnostického průzkumu se navrhuje údržba a opravy mostů.

## 5.2 METODY DIAGNOSTICKÉHO PRŮZKUMU

Tradiční diagnostický průzkum prováděný na betonových mostech v České republice se v současnosti nejčastěji skládá z následujících postupů:

- vizuální prohlídka konstrukce – fotodokumentace a popis poruch, případně zjištění jejich příčin;
- stanovení základních chemických vlastností betonu – stanovení pH betonu, hloubky karbonatace a množství chloridových iontů;
- zjišťování kvality betonu – sklerometricky s upřesněním na jádrových vývrtech;
- stanovení pevnosti v tahu povrchových vrstev – pomocí odtrhové zkoušky;
- zjištění množství a polohy výztuže v ŽB konstrukcích – dříve radiograficky, nyní spíše elektromagnetickou indukční metodou a stále častěji též pomocí georadaru, ověření tloušťky výztuže je prováděno pomocí sekaných sond;
- zjištění stavu předpínací výztuže – nejčastěji pomocí destruktivního odstranění betonové krycí vrstvy.

V současnosti se termografie při diagnostických průzkumech v České republice běžně nepoužívá. V *TP 72 – Diagnostický průzkum mostů PK* (kapitola 5.3) je však termografie uvedena jako jedna z metod, kterou lze zjišťovat odlamování betonové vrstvy a vlhkost konstrukce [41]. Tyto poruchy, popis jejich vzniku a principy měření jsou uvedeny v následující kapitole.

## 6 TEORETICKÁ ANALÝZA

### 6.1 VYBRANÉ PORUCHY BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ

V kapitole jsou uvedeny a podrobně popsány takové typy poruch betonových konstrukcí, které je možné detekovat mimo jiné pomocí termografické zkušební metody.

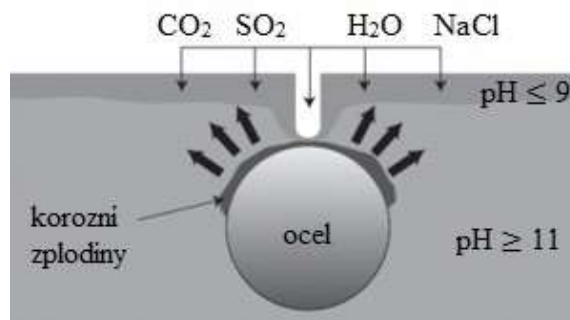
#### 6.1.1 Delaminace betonové vrstvy z důvodu koroze výztuže

Ocelová výztuž zabudovaná v betonové konstrukci je přirozeně chráněna proti korozi díky vysoké zásaditosti cementobetonového tmele ( $\text{pH} \geq 11$ ) a přiměřené tloušťce krycí betonové vrstvy. Do betonu však mohou pronikat agresivní látky a měnit jeho chemické vlastnosti. Postupem času dochází vlivem působení oxidu uhličitého k tzv. karbonataci betonu. Zásadité složky betonu, jako je portlandit -  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , reagují se vzdušným oxidem uhličitým -  $\text{CO}_2$  za vzniku různých karbonátů -  $\text{CaCO}_3$  a vody. Jak postupuje  $\text{CO}_2$  hlouběji do betonu, ubývá  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  a tím se snižuje pH krycí vrstvy. Když pH betonu klesne pod hodnotu 9, rozpadne se vrstvička hutných oxidů železa mezi ocelí a betonem a dojde k tzv. depasivaci výztuže [92]. Rychlost koroze ovlivňuje mnoho faktorů, například: složení ocelové výztuže, obsah vody v betonu a její pH, teplota či frekvence střídání sucha a vlhka [93]. Dále se na urychlení rozvoje koroze mohou podílet i soli používané při zimní údržbě vozovek či jiné škodlivé látky.



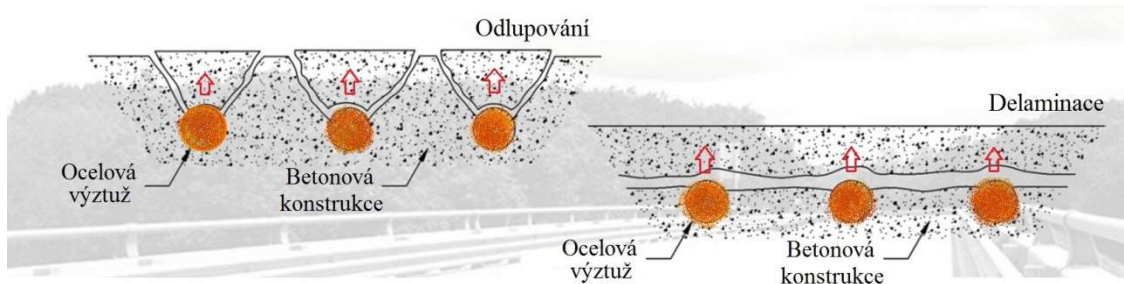
**Obr. 19:** Delaminace na povrchu betonového nosníku mostu spojená s korozí výztuže

Ve většině případech je ocelová výztuž v betonových mostech dobře chráněna proti korozi díky dostatečné tloušťce krycí betonové vrstvy. Vinou nevhodných předpisů, nedostatku kvalitního stavebního materiálu či z důvodu pracovní nekázně však tu a tam v minulosti docházelo k nevhodnému uložení výztuže. Výztuž bývala umísťována příliš blízko k povrchu s nedostatečným betonovým krytím. Trvalo proto jen několik málo let než tenká vrstva betonu nad výztuží zkarbonatovala. Výztuž pak v betonu, který nebyl dostatečně odolný vůči průnikům škodlivých látek, mnohem rychleji podléhala korozi (obr. 19).



**Obr. 20:** Koroze ocelové výztuže v betonu [94]

Korozní produkty mají podstatně větší objem než původní kov. Jejich tvorba má za následek zvýšený tlak na betonovou krycí vrstvu (obr. 20). S přibýváním korozních produktů se tento tlak zvyšuje až do vzniku trhlin a delaminací betonové krycí vrstvy nebo odlupování menších částí pouze nad pruty výztuží (obr. 21). Následně může dojít až k úplnému odtržení částí betonu. V případě, že se pod mostem nachází jiná komunikace, hrozí riziko poškození projíždějícího vozidla nebo v horším případě poranění osob při zasažení odtrženým kusem betonu.



**Obr. 21:** Odlupování a delaminace

### 6.1.2 Poruchy sanovaných povrchů betonových konstrukcí

Další typy závad, zajímavých z hlediska použití termografické metody, jsou poruchy oprav betonových konstrukcí. V současnosti je většina oprav betonových konstrukcí v ČR prováděna na profesionální úrovni podle vyspělých konceptů sanací betonu a železobetonu. K tomu slouží moderní sanační technologie, které jsou od roku 1990 k dispozici prakticky v neomezeném rozsahu. Z nejrůznějších důvodů však stále v nezanedbatelné míře dochází k selhávání sanačních zásahů před jejich předpokládanou dobou životnosti. Kromě ohrožení bezpečnosti během užívání, znamená odstraňování poruchy také opětovné omezení provozu a samozřejmě i další nemalé finanční náklady [1]. Mezi nejčastější typy poruch oprav betonových částí mostů patří:

- oddělení vrstev sanačního systému od podkladu, nebo vrstev systému mezi sebou (obr. 22);
- porucha podkladu pod sanačním systémem;
- výskyt nové a/nebo pokračující koroze výztuže v sanované části (obr. 23);
- objemové změny betonu (nové nebo pokračující) a/nebo sanačních malt vedoucí k poruchám (rozpad, oddělení, trhliny atd.);
- poruchy (netěsnost) hydroizolačních systémů včetně zálivek a tmelů spár.

Dříve než dojde k odpadnutí oddělené vrstvy sanace, lze za vhodných podmínek delaminaci detekovat pomocí termokamery. Tento princip bude podrobně popsán v následujících kapitolách.



**Obr. 22:** Oddělení vrstvy sanace od betonového podkladu křídla opěry mostu



**Obr. 23:** Pokračování původní koroze pod sanovaným ŽB trámem



### 6.1.3 Zatékání do konstrukce

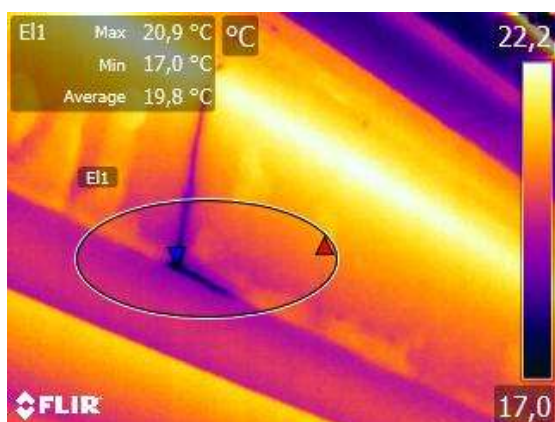
Zatékání do konstrukce mostu bývá nejčastěji způsobeno nefunkčními vrstvami hydroizolace nebo poškozenými mostními závěry. Přítomnost vody/vlhkosti urychluje degradační procesy betonu, betonářské i předpínací výztuže. V případě průniku vody přes poškozený mostní závěr může docházet k zatékání na čela předpjatých nosníků, na úložné prahy opěr a jiné prvky spodní stavby či k ložiskům mostu (obr. 24). Přes nefunkční hydroizolaci pak může voda prosakovat v ploše mostu k výztuži nosné konstrukce nebo až do dutin mezi nosníky (obr. 25). Na komunikacích je navíc vždy nutné počítat s přítomností chemických rozmrazovacích látek, které celou situaci ještě ztěžují. Přítomnost vody urychluje korozi nejen výztuže, ale i další kovových součástí mostu (ložiska, svodidla apod.). Betonové konstrukce může také v zimních obdobích narušovat led při zamrzání vody přítomné v konstrukci. Vznikající led degraduje povrchovou vrstvu zvýšeným pórovým tlakem. Tento proces vede k otevírání kapilár a zvětšování pórů, do kterých po rozmrznutí nateče další voda. S příchodem nového mrazu se cyklus opakuje. Míra degradace betonu je úměrná počtu zmrazovacích cyklů.



**Obr. 24:** Rozpadlý beton a „jezíčko“ na úložném prahu opěry



**Obr. 25:** Průsak vody v místě dobetonávky mezi dolními přírubami nosníků I73



**Obr. 26:** Mokrý povrch betonového nosníku mostu od porušené izolace



**Obr. 27:** Zátok na úložný práh pravděpodobně porušeným mostním závěrem

Zatékání do konstrukce může probíhat delší dobu bez viditelných následků. Pokud je například betonový povrch znečištěný nebo hůře dostupný bez pracovní plošiny, nemusí být vlhký povrch vůbec patrný. Při lokalizaci vlhkého povrchu způsobeného zatékáním do konstrukce mostu může na větší vzdálenost pomoci termokamera. Lze tak například zkontrolovat podhled nosné konstrukce mostu (obr. 26) nebo úložné prahy (obr. 27) přímo ze země.

Při detekci mokrých/vlhkých povrchů se vychází ze skutečnosti, že kapalina při vypařování odebírá teplo ze svého okolí. Podle kinetické teorie se z kapaliny vypařují ty molekuly, jejichž energie je dostatečná k překonání kohezních sil, a jejichž pohyb směřuje k volnému povrchu kapaliny, takže projdou povrchovou vrstvou a opustí kapalinu. Kapalinu tedy opouštějí molekuly s největší energií. Pokud je těchto molekul větší množství, vede to ke snížení střední energie zbývajících molekul kapaliny [95]. To se projeví snížením teploty kapaliny včetně samotného nasáklého betonu.

Rychlost vypařování závisí především na teplotě kapaliny a okolí, velikosti tlaku vzduchu a jeho pohybu nad kapalinou a také na ploše povrchu, z něhož dochází k odpařování. Množství tepla, které je potřebné k přeměně jednoho kilogramu vody v plynnou fázi se pohybuje mezi  $l_v = 2,51 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  pro vodu při teplotě  $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $l_v = 2,26 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  pro vodu o teplotě  $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Teplo potřebné k odpaření vody o hmotnosti  $m$  se vypočítá z rovnice:

$$L_v = ml_v \quad (11)$$

kde:

$L_v$  – skupenské teplo vypařování (J)

$l_v$  – měrné skupenské teplo vypařování ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

$m$  – hmotnost (kg)

Dosazením do předchozí rovnice lze vypočítat například teplo potřebné pro vypaření 10 ml vody o teplotě  $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Řešení:

- hmotnost vody je  $m_{10} = 0,01 \text{ kg}$ , měrné skupenské teplo vypařování při  $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$  je  $l_{v1} = 2,49 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;

- pro teplo potřebné k přeměně kapaliny o teplotě 10 °C na páru platí:  
 $L_v = 2,49 \cdot 10^6 \cdot 0,01 \text{ J} = 24,9 \cdot 10^3 \text{ J}.$

Teplo spotřebované na vypaření vody se projeví snížením teploty okolní kapaliny a blízkého betonu. Pokud budeme pro názornost považovat soustavu za ideálně izolovanou, pro kterou platí zákon zachování energie, lze tepelnou výměnu popsat na základě kalorimetrické rovnice:

$$Q_1 = Q_2 \quad (12)$$

rovnici lze vyjádřit také vztahem:

$$c_1 m_1 (t - t_1) = c_2 m_2 (t_2 - t) \quad (13)$$

kde:

$c_1$  – měrná tepelná kapacita tělesa 1 ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )

$m_1$  – hmotnost tělesa 1 (kg)

$t_1$  – počáteční teplota tělesa 1 (K)

$c_2$  – měrná tepelná kapacita tělesa 2 ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )

$m_2$  – hmotnost tělesa 2 (kg)

$t_2$  – počáteční teplota tělesa 2 (K)

$t$  – teplota po vyrovnání (K)

Dosazením do předchozích rovnic a jejich úpravou lze například určit, o kolik se sníží teplota 10 kg betonu nasáklého 300 ml vody o teplotě 10 °C, pokud se 10 ml této vody z betonového povrchu odpaří (soustavu budeme považovat za ideálně izolovanou).

Řešení:

- pro beton platí  $m_B = 10 \text{ kg}$ ,  $c_B = 1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,
- pro vodu platí  $m_V = 0,29 \text{ kg}$ ,  $c_V = 4200 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,
- teplo potřebné k přeměně 10 ml vody o teplotě 10 °C na páru  $L_v = 24,9 \cdot 10^3 \text{ J}$ ,
- do (12) dosadíme za  $Q_1 = L_v$  a za  $Q_2 = c_B m_B \Delta t + c_V m_V \Delta t$ ,
- po úpravě vznikne rovnice:  $\Delta t = \frac{L_v}{c_B m_B + c_V m_V}$ ,
- po dosazení:  $\Delta t = \frac{24900}{1000 \cdot 10 + 4200 \cdot 0,29} \text{ °C} = 2,2 \text{ °C}.$

Z uvedeného příkladu plyne, že na odpaření 10 ml vody z betonového povrchu, je potřeba dodat množství tepla, které odpovídá změně teploty okolních 10 kg betonu a zbylých 290 ml vody o 2,2 °C. Takový teplotní rozdíl na betonovém povrchu je dostatečný k tomu, aby ho bylo možné v reálné situaci detekovat pomocí termokamery, a odpovídá přibližně situaci na termogramu na obr. 27.

## 6.2 ZJIŠŤOVÁNÍ SKRYTÝCH PORUCH POMOCÍ TERMOKAMERY

Měření s ruční termokamerou je poměrně snadné a lokalizaci skrytých vad zvládne po krátkém zaškolení každý schopnější technik. Aby však bylo možné matematicky popsat celý proces přenosu tepla v konstrukci, umožňující vznik teplotních kontrastů na jejím povrchu, zavádí se řada zjednodušení.

Přenos (sdílení) tepla probíhá třemi způsoby: vedením (kondukce), prouděním (konvekcí) a zářením (radiací). Přenos tepla je v reálných situacích obvykle kombinací dvou nebo všech tří uvedených způsobů. Uvnitř konstrukce se teplo přenáší vedením. Na styku vzduchu a povrchu konstrukce dochází k přenosu tepla prouděním, zároveň je tímto povrchem pohlcováno a emitováno záření.

### 6.2.1 Přenos tepla vedením

Vedení tepla probíhá prostřednictvím vzájemných srážek částic s různou teplotou. Při tomto procesu předávají částice o vyšší teplotě část své střední energie částicím o nižší teplotě. Šíření tepla prostřednictvím vedení probíhá v každé látce, tedy například i v betonové konstrukci mostu. Prostup tepla pevnou látkou lze analogicky přirovnat k průtoku vody potrubím. Z tohoto hlediska lze vedení tepla rozdělit na:

- ustálené (stacionární) vedení tepla – při ustáleném vedení je teplotní rozdíl mezi jednotlivými částmi tělesa je stálý, tedy nezávislý na čase;
- neustálené (nestacionární) vedení tepla – při neustáleném vedení postupně dochází k pozvolnému vyrovnávání teplotních rozdílů mezi jednotlivými částmi tělesa.

Přenos tepla vedením probíhá ve směru klesající teploty. V případě, kdy je teplota betonového povrchu vyšší než uvnitř konstrukce, je tedy teplo vedeno z povrchu směrem dovnitř betonové hmoty konstrukce. Pokud nabývají tyto teploty opačných hodnot, má i směr vedení tepla opačný směr. Je-li vedení tepla ustálené, platí pro velikost tepelného toku vztah:

$$Q_{\tau} = \lambda S \frac{\Delta t}{d} \quad (14)$$

kde:

$Q_{\tau}$  – tepelný tok (W)

$\lambda$  – součinitel tepelné vodivosti ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )

$S$  – plocha, kterou dochází k vedení tepla ( $\text{m}^2$ )

$d$  – délka dráhy, po které dochází k vedení tepla (m)

$\Delta t$  – teplotní rozdíl mezi teplejším a chladnějším koncem tělesa (K)

Množství tepla, které projde za těchto podmínek zvolenou plochou  $S$  za dobu  $\tau$  je rovno:

$$Q = Q_{\tau} \cdot \tau \quad (15)$$

kde:

$Q$  – teplo (J)

$\tau$  – čas (s)

### 6.2.2 Přenos tepla prouděním

Přenos tepla prouděním probíhá například na styku plynného prostředí s betonovou stěnou. Při tom dochází k ochlazování nebo ohřívání tenké vrstvy vzduchu při stěně. Vzniklý rozdíl teplot vrstev pak způsobuje přirozené proudění. Na obr. 28 vlevo označuje písmeno  $A$  oblast sdílení tepla prouděním ze vzduchu do stěny, na obrázku vpravo označuje písmeno  $B$  oblast sdílení tepla prouděním ze stěny do vzduchu. Rovnice, která vyjadřuje tepelný tok při sdílení tepla prouděním, je dána vztahem:

$$Q_{\tau} = \alpha S \Delta t \quad (16)$$

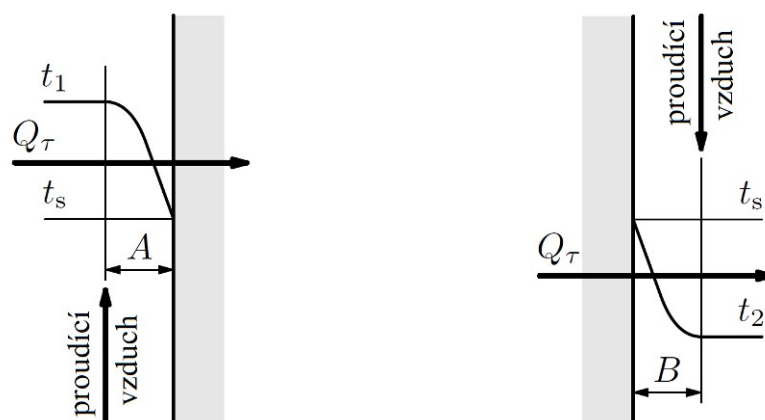
kde:

$Q_{\tau}$  – tepelný tok (W)

$\alpha$  – součinitel přestupu tepla ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )

$S$  – plocha stěny ( $\text{m}^2$ )

$\Delta t$  – rozdíl teplot ohříváného (ochlazovaného) vzduchu (K)



**Obr. 28:** Sdílení tepla prouděním: do konstrukce (vlevo); z konstrukce (vpravo)

Součinitel přestupu tepla  $\alpha$  udává tepelný tok přestupující ze vzduchu do stěny (nebo naopak), je-li  $S = 1 \text{ m}^2$ ,  $\Delta t = 1 \text{ K}$  za dobu 1 sekundy. Velikost součinitele  $\alpha$  přestupu tepla nelze obecně vyjádřit jednoduchým početním vztahem, ale je nutné ho pro různé situace dopočítat, velmi často odhadovat empiricky.

### 6.2.3 Přenos tepla zářením

Tepelné záření vydává každé těleso, jehož teplota je vyšší, než 0 K. Intenzita záření je pak podle (5) přímo úměrná čtvrté mocnině teploty tohoto tělesa v Kelvinech. Záření je vysíláno ve formě elektromagnetických vln do prostoru, který těleso obklopuje.

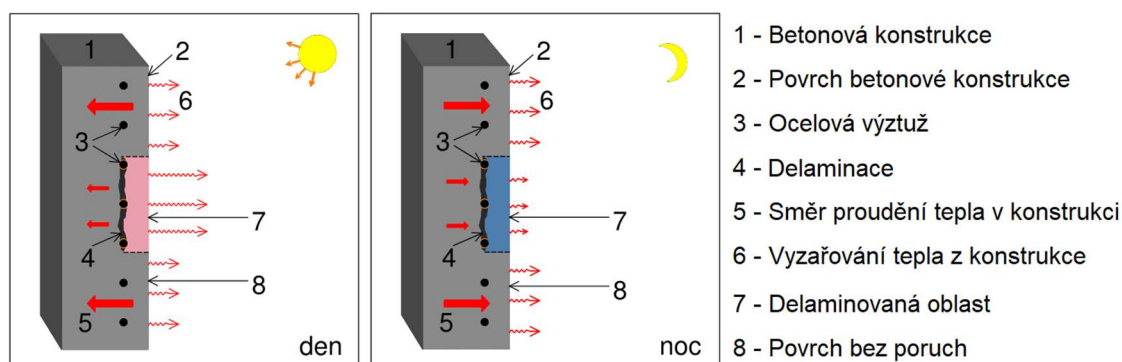
Dopadne-li toto záření na jiné těleso, je částečně pohlceno, část se odráží a část prochází tělesem. Pohlcené záření způsobuje zvýšení vnitřní energie tělesa, odražené záření dopadá na další tělesa.

Za běžných podmínek je povrch betonového mostu nejvíce zahříván, pokud na něj dopadá přímé sluneční záření. Jeho intenzita činí v našich podmínkách v letním poledni maximálně  $1000 \text{ až } 1050 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  [96]. Tato hodnota ovšem platí pro plochu kolmou na směr slunečních paprsků. Povrchy mostů zkoumané pomocí termokamery jsou většinou orientovány svisle. V reálné situaci dopadá záření o největší intenzitě na tyto svislé plochy v ranních hodinách, pokud jsou orientovány východním směrem a sluneční záření je na ně téměř kolmé. Podobná situace platí v podvečerních hodinách u ploch orientovaných na západ. Dalšími faktory, které ovlivňují intenzitu dopadajícího slunečního záření, jsou výška slunce nad horizontem (měnící se v závislosti na roční době), oblačnost či místní překážky, jako jsou stromy nebo budovy.

Pohltivost a odrazivost záření betonové konstrukce závisí především na jakosti povrchu a také na jeho barvě. Světlejší odstín více odráží záření než tmavší (špinavý) betonový povrch, a proto se ve srovnání s ním méně zahřívá. Jakost materiálu ve vztahu ke schopnosti vyzařovat záření definuje emisivita  $\varepsilon$  tělesa. Emisivita je definovaná jako poměr intenzity vyzařování reálného tělesa k intenzitě vyzařování absolutně černého tělesa se stejnou teplotou. Pro hrubý betonový povrch se emisivita pohybuje kolem hodnoty  $\varepsilon = 0,95$ . To znamená, že 95 % záření emitovaného betonovým tělesem je skutečně jeho vlastní vyzařování, zatímco zbylých 5 % je pouze okolní záření, které se od tělesa odráží.

#### 6.2.4 Vznik teplotního kontrastu v místě poruchy

Jak už bylo zmíněno výše, teplo prostupuje tělesem ve směru klesající teploty. To samé platí samozřejmě i pro betonovou konstrukci mostu. Během dne dochází obvykle ke kolísání mezi denní a noční teplotou. Na tyto změny reaguje i konstrukce. Vlivem dopadajícího slunečního záření a/nebo vzrůstající okolní teploty se nejprve ohřívá povrch objektu, od kterého se teplo šíří vedením hlouběji do konstrukce. Pokud naopak dojde ke snížení okolní teploty (v noci), konstrukce se ochlazuje a teplo se šíří vedením opačným směrem. Z povrchu je pak teplo odváděno vyzařováním a zároveň prouděním (předává energii okolnímu vzduchu).



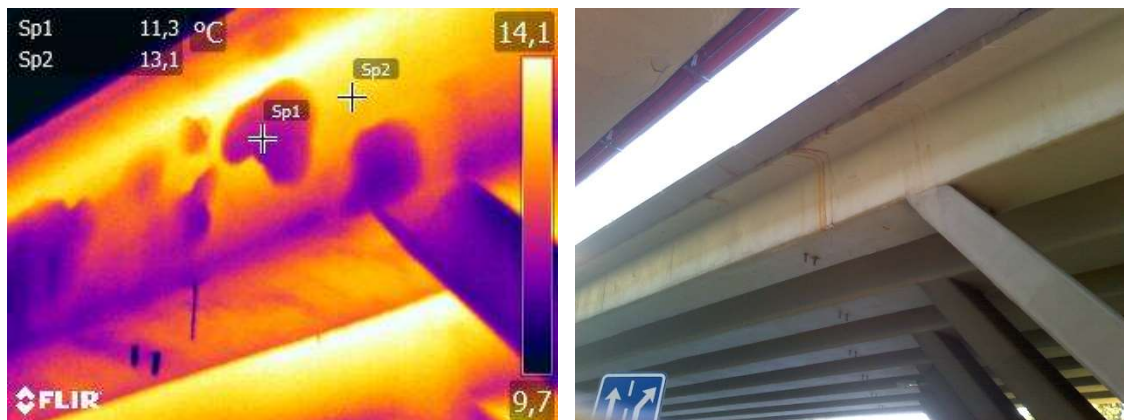
**Obr. 29:** Vznik teplotního kontrastu v místě poruchy



V případě, kdy se pod povrchem konstrukce nachází nějaká porucha (např. delaminace) nebo jiná dutina, působí vzduch zde obsažený jako „izolace“, která omezuje proudění tepla (obr. 29). Tato porucha způsobuje, že se povrch nad ní zahřívá více než okolní povrch konstrukce bez závad. Důvodem je omezení odvodu tepla z povrchu do hloubky konstrukce. Při ohřívání konstrukce lze proto očekávat, že oblasti nad poruchou budou teplejší než okolní nepoškozený beton – vzniká tzv. pozitivní teplotní kontrast (obr. 30). Při ochlazování konstrukce nastává opak, lze pozorovat tzv. negativní teplotní kontrast (obr. 31). Ten je zapříčiněn skutečností, že dutina omezuje proudění tepla směrem z vnitřku konstrukce k jeho povrchu. Díky tomu se betonová vrstva se nad dutinou ochladí rychleji než okolní betonový povrch. Tyto plochy s rozdílnými teplotami lze snadno lokalizovat pomocí termokamery.



**Obr. 30:** Delaminovaný povrch úložného prahu mostu (žlutá barva)



**Obr. 31:** Měření v ranních hodinách; delaminovaný povrch nosníku mostu je chladnější než zbytek konstrukce

### 6.2.5 Rovnice termografie

Při termografickém zkoušení je vždy potřeba myslet na skutečnost, že termokamera neměří teplotu přímo, ale stanovuje ji výpočtem na základě tzv. rovnice termografie (17) případně pomocí jejího zjednodušeného tvaru (18). Do výpočtu vstupuje kromě naměřené intenzity tepelného záření také řada parametrů, které jsou stanoveny doplňkovým

měřením nebo kvalifikovaně odhadnuty [97]. Tyto parametry jsou podrobně rozebrány v kapitole 6.2.6. Graficky je skladba jednotlivých složek rovnice termografie znázorněna na obr. 32, samotná rovnice nabývá tvaru:

$$\tau\varepsilon\Phi_{obj} + (1 - \varepsilon)\tau\Phi_{refl} + (1 - \tau)\Phi_{atm} = \Phi_{celk} \quad (17)$$

kde:

$\Phi_{obj}$  – vlastní záření objektu (W)

$\Phi_{refl}$  – odražené zdánlivé záření (W)

$\Phi_{atm}$  – vlastní vyzařování atmosféry (W)

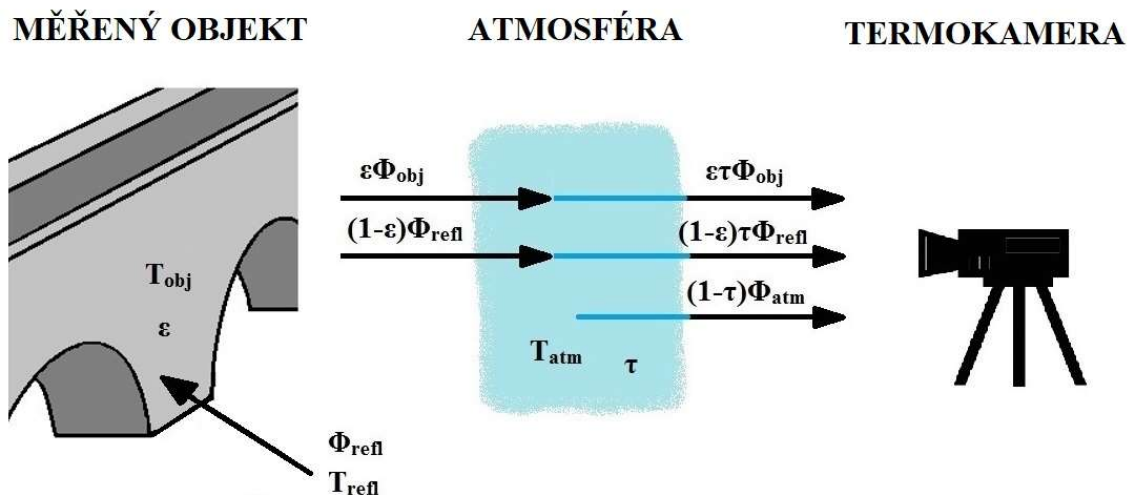
$\Phi_{celk}$  – celkový zářivý tok, který dopadá na detektor termokamery (W)

$\varepsilon$  – emisivita (-)

$\tau$  – koeficient průchodu atmosférou (na krátkou vzdálenost měření lze zanedbat, pak  $\tau = 1$ )

pro  $\tau = 1$  lze předchozí rovnici zjednodušit:

$$\varepsilon\Phi_{obj} + (1 - \varepsilon)\Phi_{refl} = \Phi_{celk} \quad (18)$$



**Obr. 32:** Skladba záření přicházející do termokamery

Složka  $\varepsilon\tau\Phi_{obj}$  v rovnici (17) odpovídá zářivému toku z objektu o teplotě  $T_{obj}$  zeslabeného průchodem atmosférou.

Složka  $(1 - \varepsilon)\tau\Phi_{refl}$  představuje odražený zářivý tok z okolních zdrojů, kde  $(1 - \varepsilon)$  vyjadřuje odrazivost objektu (předpokládáme, že záření přicházející z okolí představuje záření z povrchů v myšlené polokouli, které mají emisivitu = 1 a stejnou teplotou  $T_{refl}$ ).

Poslední složka  $(1 - \tau)\Phi_{atm}$  je zářivý tok emitovaný atmosférou, kde  $(1 - \tau)$  vyjadřuje emisivitu atmosféry, jejíž teplota je  $T_{atm}$ .

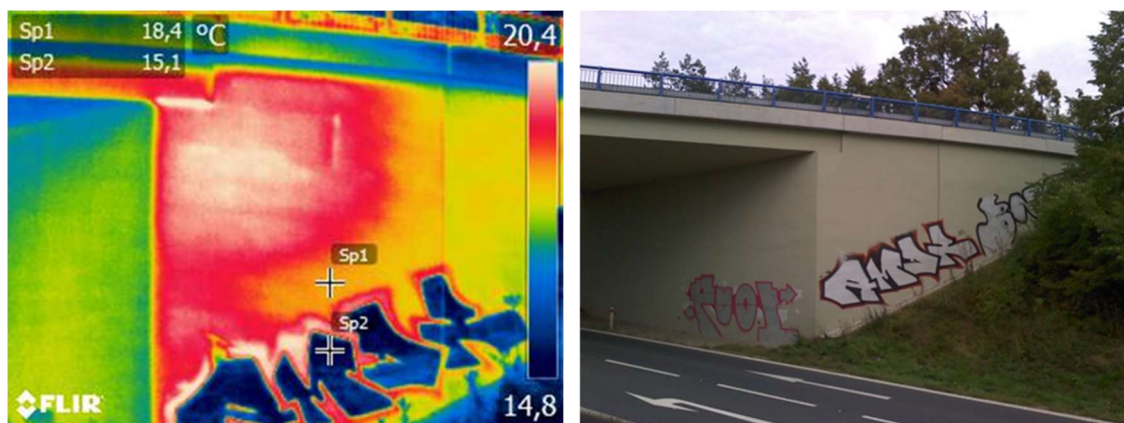


## 6.2.6 Parametry ovlivňující měření

Pro správné stanovení povrchové teploty měřeného objektu je nezbytné nastavit co nejpřesněji všechny parametry, které vstupují do rovnice termografie. Běžně prodávané termokamery umožňují nastavit řadu parametrů již během měření. Případně je možné tyto hodnoty upravit až v softwaru, ve kterém probíhá vyhodnocování pořízených termogramů. Jedná se o následující parametry:

- emisivita měřeného objektu (-)
- odražená zdánlivá teplota ( $^{\circ}\text{C}$ )
- atmosférická teplota ( $^{\circ}\text{C}$ )
- relativní atmosférická vlhkost (%)
- vzdálenost mezi termokamerou a povrchem měřeného objektu (m)

Pojem emisivita už byl vysvětlen v předchozích kapitolách. Co se však stane, pokud je hodnota emisivity nastavena špatně? Termokamera pro danou povrchovou teplotu a nastavenou emisivitu očekává určité množství tepelného záření. Pokud je hodnota emisivity povrchu měřeného objektu nižší, než jaká je nastavená v termokameře – dopadá na detektor termokamery méně tepelného záření, než kolik termokamera očekává a ta pak vyhodnotí tuto skutečnost jako nižší povrchovou teplotu, než je reálná teplota povrchu. Naopak pokud je emisivita povrchu vyšší než nastavená, termokamera určí povrchovou teplotu jako vyšší. Obr. 33 ukazuje křídlo betonového mostu posprejovaného grafity. Na termogramu se jeví barevný povrch zdánlivě chladnější, rozdíl činí až  $3^{\circ}\text{C}$ . Ve skutečnosti jsou povrchové teploty přibližně stejné.



**Obr. 33:** Vliv posprejovaného povrchu na naměřenou teplotu

Odražená zdánlivá teplota charakterizuje tepelné záření, které se od povrchu měřeného objektu odráží k termokameře. Termokamera pak přirozeně není schopna rozlišit, zda jde o vlastní tepelné záření zkoumaného objektu, nebo odražené tepelné záření. Vliv odražené zdánlivé teploty je tím větší, čím vyšší je odrazivost povrchu. Naopak s vysokou emisivitou klesá vliv odražené zdánlivé teploty. Povrch většiny stavebních materiálů (mimo kovy) má hodnotu emisivity dostatečně vysokou ( $\geq 0,95$ ),

což umožňuje stanovit odraženou zdánlivou teplotu pouze přibližně odhadem bez výrazného vlivu na správnost měření.

Na obr. 34 je patrný odraz pracovníka na podhledu trámu relativně nového mostu. Hladký betonový povrch na spodní straně trámu má nižší emisivitu než hrubý beton většiny starších mostů. Zároveň se při ostrém úhlu, který svírají paprsky IR záření se spodní plochou trámu, snižuje směrová emisivita betonového povrchu. V tomto případě je rozdíl v teplotě jen jeden stupeň celsia. Avšak v případě měření teploty lesklého kovu může rozdíl mezi naměřenou a skutečnou teplotou samotného materiálu činit i desítky stupňů celsia, pokud se od měřeného materiálu odráží nějaký výrazný zdroj tepla.



**Obr. 34:** Ukázka vlivu odražené zdánlivé teploty a ostrého úhlu měření

Molekuly vody a oxidu uhličitého ve vzduchu pohlcují IR záření. Atmosféra jako plynné těleso o jisté teplotě také sama vyzařuje tepelné záření. Celkový vliv atmosféry na výsledek měření lze naštěstí s vysokou přesností kompenzovat po změření atmosférické teploty, atmosférické vlhkosti a vzdálenosti od měřeného objektu. Tyto hodnoty jsou v rovnici (17) zahrnuty do koeficientu  $\tau$ . Pro řadu aplikací však lze vliv atmosféry úplně zanedbat, potom platí  $\tau = 1$  a rovnice nabývá zjednodušeného tvaru (18).

Měření může být také negativně ovlivněno dalšími objekty v blízkosti zkoumané konstrukce. Budovy nebo například stromy mohou vrhat stín na zkoumaný objekt a způsobovat tak nerovnoměrné zahřívání jeho povrchu. Tento efekt může přetrvávat i desítky minut po konci osvětlení povrchu díky naakumulovanému teplu v konstrukci.

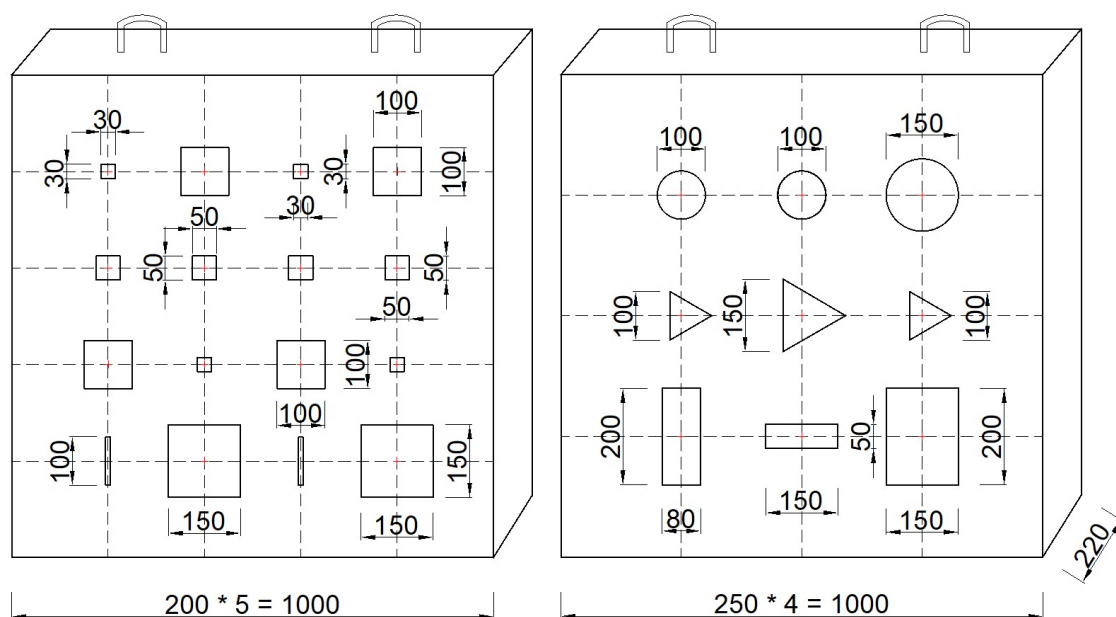
Vlastní nejistota termokamery se u běžně dostupných modelů pohybuje v rozmezí maximálně  $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  nebo  $\pm 2\%$  z měřeného údaje. Při lokalizaci defektů na povrchu betonových mostů je však důležitější určení teplotních rozdílů na povrchu zkoumaného objektu než stanovení teploty s absolutní přesností, proto jsou drobné nepřesnosti termokamery přijatelné.

## 7 EXPERIMENT NA ZKUŠEBNÍM TĚLESE

Výroba zkušebního tělesa, stejně jako téměř veškeré měření na něm, probíhalo v prostorech Centra dopravního výzkumu, v. v. i. na ulici Líšeňská 33a v Brně. Těleso bylo vyrobeno v únoru 2016, měření probíhalo s přestávkami v následujících třech letech až do července 2019. V následující kapitolách jsou popsána provedená měření. Na konci kapitoly 7 jsou porovnány naměřené hloubky defektů, celkové srovnání použitých metod je uvedeno v závěru.

### 7.1 NÁVRH A VÝROBA ZKUŠEBNÍHO TĚLESA

Pro účely experimentu byl navržen betonový blok o rozměrech  $1,0 \times 1,0$  m a tloušťce 0,22 m. Tyto rozměry byly zvoleny pro zachování určitého stupně manipulovatelnosti se zkušebním tělesem, tak aby bylo možné ho naložit na paletu a přepravovat ho pomocí ručního paletového vozíku. Do bloku byly zabetonovány ocelové závěsy, díky nimž je možné blok s pomocí mostového jeřábu podle potřeby sklápět či otáčet.



**Obr. 35:** Návrh zkušebního tělesa: strana A (vlevo) a strana B (vpravo)

Před betonáží byly do formy ve dvou vrstvách uchyceny kusy polystyrénu, které při měření sloužily k simulaci dutin či delaminací. První vrstva těchto umělých defektů byla umístěna v hloubce 0,5–4 cm pod přední stranou betonového bloku – označeno jako strana A (obr. 35 vlevo). Druhá vrstva byla umístěna do hloubky 4–10 cm pod povrch strany B betonového bloku (obr. 35 vpravo). Přesná hloubka uložených umělých defektů nebyla při měření přesně známa a byla zjištěna až po konci nedestruktivního zkoušení prostřednictvím odebraných mikro-vývrtů.

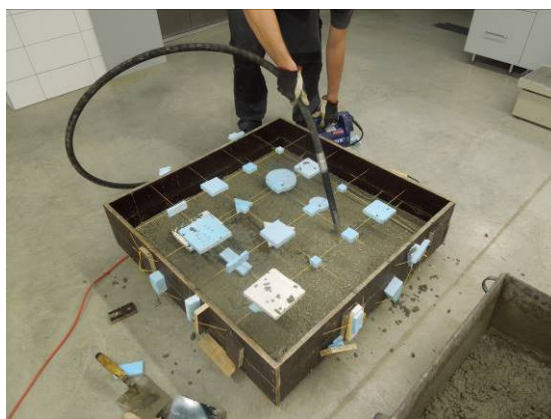
Při betonáži byla použita následující receptura (hodnoty odpovídají 1 m<sup>3</sup> betonu):

Cement CEM I 42,5 R Mokrý	400 kg
Kamenivo frakce 0/4	630 kg
Kamenivo frakce 4/8	255 kg
Kamenivo frakce 8/16	525 kg
Kamenivo frakce 11/22	290 kg
Plastifikátor SikaPlast-110 ECO	4 kg
Provzdušňovací přísada Sika Fro-V5-A	1 kg
Voda	150 kg
CELKEM	2255 kg

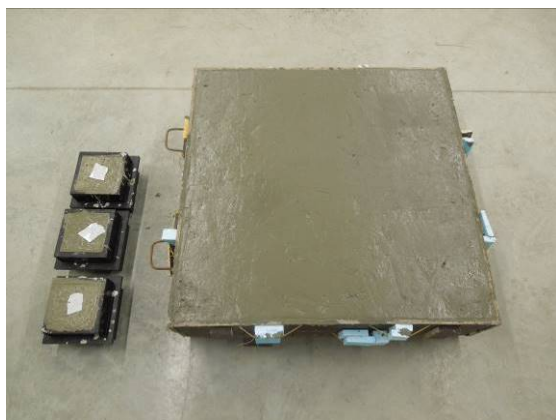
Při betonáži (obr. 36-39) byly vyrobeny také tři standartní zkušební tělesa tvaru krychle o hraně délky 15 cm. Po 28 dnech od betonáže byla všechna tato tři tělesa použita ke stanovení krychlené pevnosti betonu v tlaku (obr. 40). Průměrná pevnost dosáhla hodnoty 58 MPa. Materiálové vlastnosti použitých materiálů jsou uvedeny v tabulce 3. Před měřením byla na obě strany betonového bloku narýsována mřížka 5 × 5 cm.



**Obr. 36:** Umělé defekty připravené ve formě před betonáží



**Obr. 37:** Vibrování betonové směsi během betonáže



**Obr. 38:** Zahlazený povrch zkušební bloku po dokončené betonáži



**Obr. 39:** Dokončený zkušební blok



**Tabulka 3:** Materiálové vlastnosti (při teplotě 20 °C)

Materiál	Objemová hmotnost (kg · m <sup>-3</sup> )	Tepelná vodivost (W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )	Měrná tepelná kapacita (J · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )	Relativní permitivita (-)
Beton	2200	1,3-1,5	880-1020	5-10
Vzduch	1,2	0,0257	1010	1,0006
Polystyrén	40	0,04	1270	1,03

**Obr. 40:** Betonové krychle po odzkoušení v lisu

## 7.2 ODRAZOVÉ TVRDOMĚRY SCHMIDT

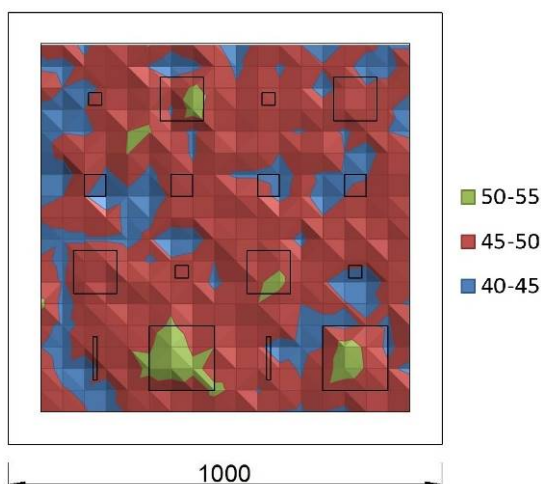
### 7.2.1 Tvrdoměr Schmidt typ N

Kromě jiných, slibnějších metod, byl při lokalizaci umělých defektů na zkušebním bloku otestován také Schmidtův tvrdoměr typu N. Při měření byla v každém čtverci připravené mřížky (kromě krajních) provedena tři měření, pokud některá hodnota příliš vybočovala, bylo provedeno náhradní měření. Následně byla z těchto výsledků vytvořena průměrná hodnota odrazů, která se pohybovala v rozmezí 40-55.

Během měření došlo ve dvou případech k proražení desky nad vloženým polystyrénem (obr. 40). Stalo se to v místě, kde byla nejmenší krycí vrstva. V ostatních případech k porušení betonového povrchu nedošlo. Z grafu (obr. 41) je patrné, že naměřené hodnoty příliš nekorrespondovaly s anomáliemi (polystyrény) pod povrchem. Pro přehlednost jsou na obrázku zobrazeny obrysy vložených umělých defektů. Pouze nad většími kusy polystyrénů dosahovaly odrazy kladívka nadprůměrných hodnot. S určitými úspěchy bylo měření provedeno pouze na straně A betonového bloku. Dutiny pod povrchem strany B betonového bloku se nacházely v takové hloubce, že už nijak neměly vliv na hodnoty odrazu Schmidtova kladívka.



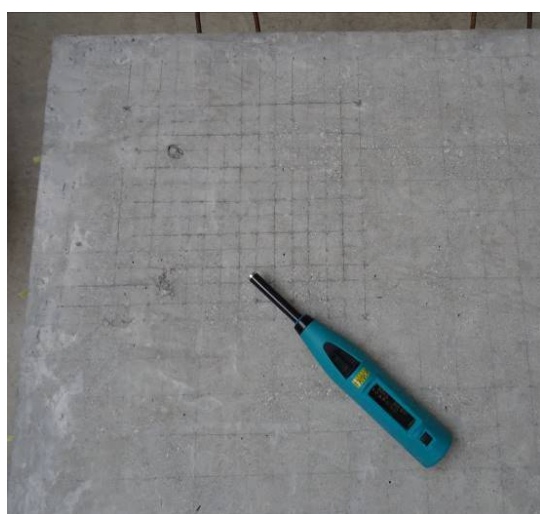
**Obr. 41:** Proražená vrstva betonu nad vloženým kusem polystyrénu



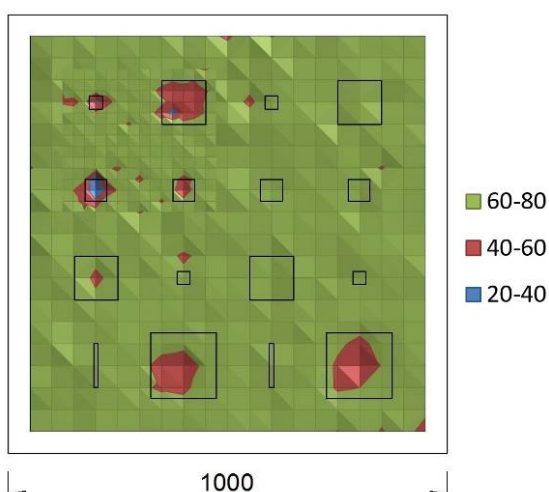
**Obr. 42:** Graf průměrných odrazů Schmidtova kladívka typu N

## 7.2.2 Tvrdoměr Silver Schmidt

I přes to, že se měření pomocí Schmidtova tvrdoměru typu N neukázalo příliš vhodné pro lokalizaci umělých defektů, bylo provedeno další tvrdoměrné měření, tentokrát s tvrdoměrem Silver Schmidt, který měří koeficient vrácené energie. Při měření byla opět využita předpřipravená mřížka na straně A zkušebního bloku. Nyní byly ovšem úder kladívkem vedeny do průsečíků mřížky. Po vyhodnocení měření se výsledek jevil o něco slibnější než v předchozím případě. Proto byla dodatečně v levé horní části zkušebního bloku narýsována podrobnější mřížka  $2,5 \times 2,5$  cm (obr. 43). Měření bylo následně provedeno ve všech průsečících této mřížky a výsledky byly sumarizovány v grafu (obr. 44). V případě větších a mělčeji uložených defektů lze pozorovat částečnou shodu naměřených hodnot se skutečným stavem.



**Obr. 43:** Tvrdoměr Silver Schmidt



**Obr. 44:** Graf odrazů tvrdoměru Silver Schmidt

## 7.3 ULTRAZVUK

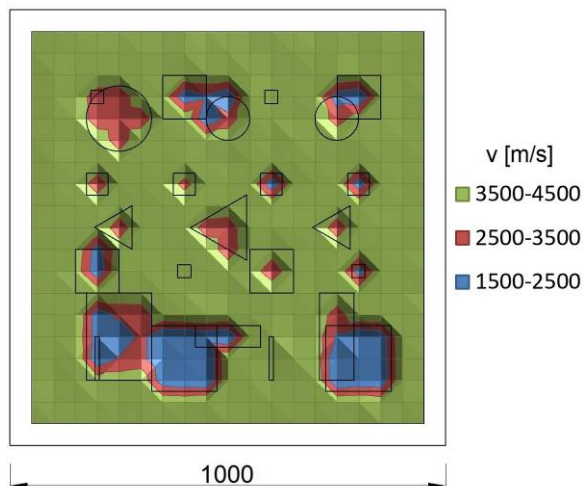
### 7.3.1 Průchodová metoda

Pro aplikaci ultrazvukové průchodové metody na zkušební blok bylo zvoleno klasické přímé prozvučování. K měření byl využit ultrazvukový přístroj TICO od firmy Proceq (obr. 45). Sondy se při měření umísťovaly naproti sobě na vyznačenou síť bodů. Vzhledem k velikosti bloku bylo potřeba měření provádět s pomocí druhé osoby, která držela jednu ze sond. Základním výstupem z měření je čas průchodu signálu přes betonový blok. Díky známé tloušťce bloku je možné jednoduše určit rychlosti šíření signálů pomocí rovnice (1). Druhou možností je zadat před měřením tloušťku zkoušeného tělesa do UZ přístroje a následně při měření zapisovat přímo rychlosti šíření UZ impulzů.

Pokud bylo měření prováděno nad větším kusem polystyrénu, došlo obvykle k prodloužení doby průchodu signálu. V případě, že bylo měření prováděno nad malým kouskem polystyrénu nebo nad okrajem většího, signál dokázal překážku snadno obejít a čas průchodu se zpravidla snížil. Na obr. 46 je zobrazen graf rychlostí šíření UZ v m/s. Do grafu jsou pro přehlednost zakresleny obrysy vložených polystyrénů z obou stran desky. Většinu se jich pomocí UZ průchodové metody podařilo lokalizovat, chybí ovšem informace, u které strany desky se ten či onen umělý defekt nachází. Průměrná rychlost UZ signálu se v místech mimo defekty pohybovala na úrovni 4250 m/s.



**Obr. 45:** Ultrazvuk TICO od firmy PROCEQ



**Obr. 46:** Graf rychlostí průchodů UZ signálu



### 7.3.2 Metoda Pulse-echo

UZ metoda pulse-echo umožňuje na rozdíl od průchodové metody provádět průzkum betonových konstrukcí i v situacích, kdy je možný přístup jen z jedné strany. Díky tomu bylo možné betonový blok položit a provádět měření ve vodorovné poloze. K měření by použitý UZ přístroj Pundit PL-200PE od firmy Proceq (obr. 47). Kvůli rozměrům měřicí základny sondy  $15 \times 7,5$  cm nebyl betonový blok změřen až těsně k okrajům. Ve směru x bylo v každé linii provedeno 16 měření a ve směru y 17 měření. Tomu odpovídá celkem 272 jednotlivých měření na každé straně desky.

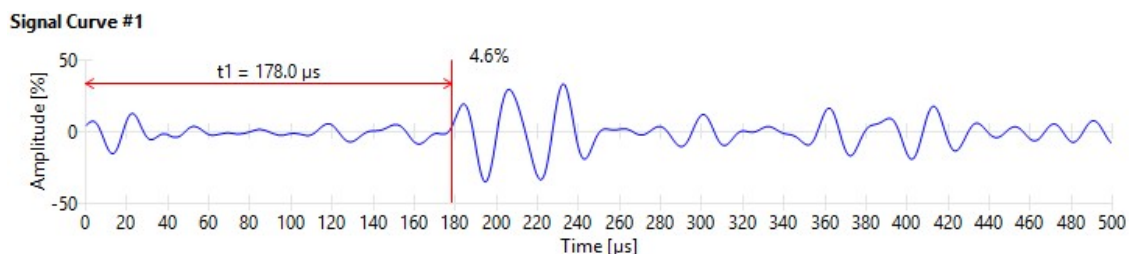
UZ přístroj používá sondy o frekvenci 50 kHz. Měření bylo provedeno s nastaveným pulsním napětím (pulse voltage) 200 V a se ziskem (gain) 100×. Jednotlivé bodové skeny přístroj automaticky skládal do předdefinovaného plošného skenu s rastrem  $16 \times 17$  a krokem měření 5 cm. Po dokončení měření byla data zkopírována do počítače a upravena v programu Proceq PL-Link dodávaného výrobcem UZ přístroje. V programu je možné nastavovat rychlost šíření UZ signálu nebo si prohlížet jednotlivé skeny a upravovat místa, která software vyhodnotil jako rozhraní (obr. 48).



**Obr. 47:** Ultrazvukový pulse-echo přístroj Pundit PL-200PE s dotykovým displejem a připojenou odrazovou sondou při měření na zkušebním bloku

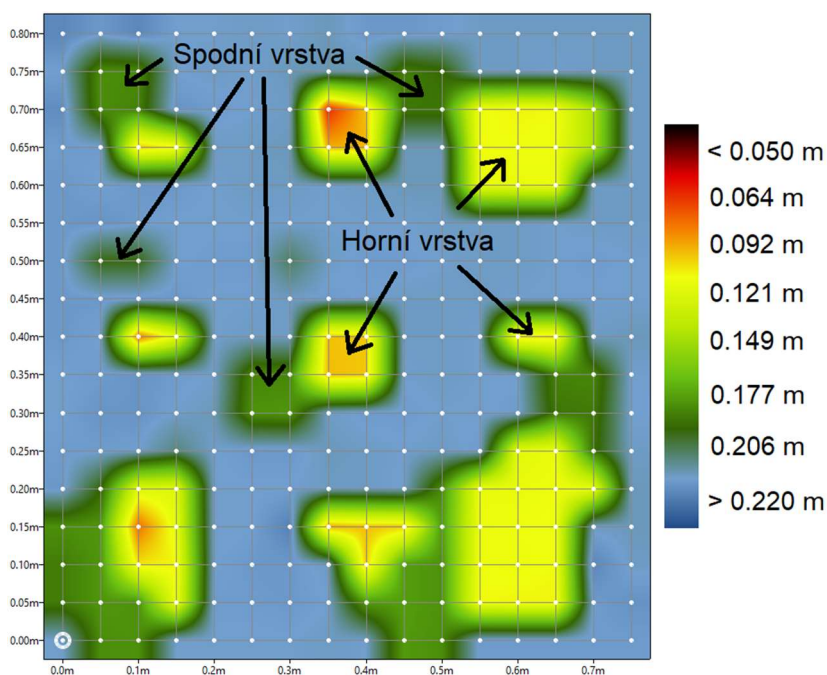


Měření bylo provedeno na obou stranách zkušebního bloku, ovšem jen na straně B bylo úspěšné. Při měření na straně A se ukázalo, že použitá pulse-echo sonda nemá dostatečné vertikální rozlišení pro měření objektů blízko pod povrchem. Na výsledném plošném skenu bohužel nebylo možné rozlišit jednotlivé umělé defekty. Výrobce sice neuvádí minimální hloubku, ve které lze objekty ještě detekovat, nicméně v manuálu UZ přístroje píše, že minimální rozměry detekovatelného objektu musí být alespoň 30 mm.

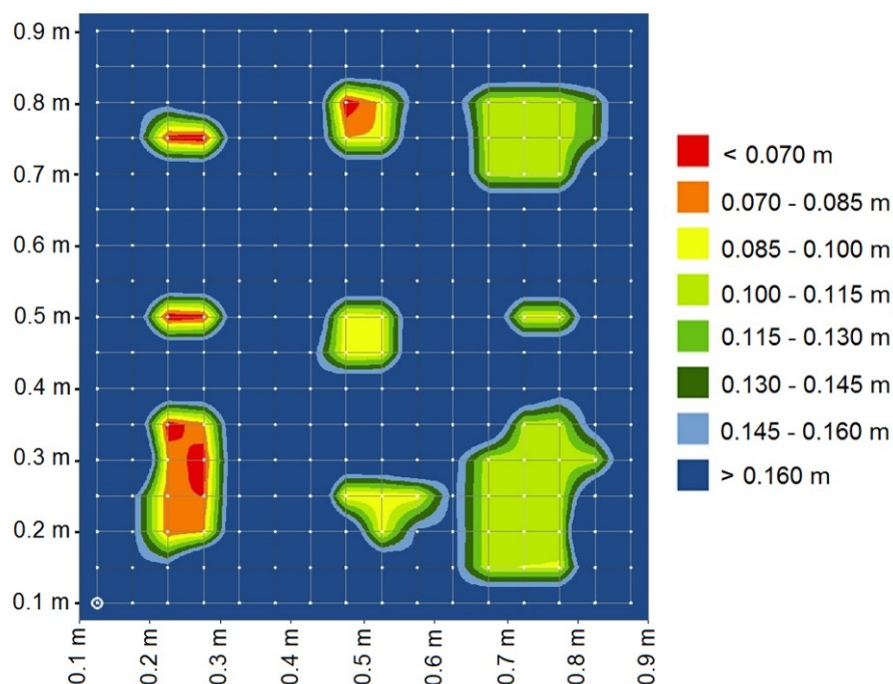


**Obr. 48:** Křivka UZ signálu s vyznačeným rozhraním na spodní ploše bloku

Pod povrchem strany B betonového bloku byly naopak lokalizovány všechny defekty nacházející se pod měřeným povrchem, a navíc i několik z druhé – hlubší vrstvy, které při měření nebyly v zákrytu (obr. 49). Z průměrných časů odrazů UZ pulzů od zadní stěny bloku byla podle (1) určena rychlost šíření UZ signálu v betonu 2470 m/s (příčné vlnění). Tato rychlost pak byla v programu použita pro stanovení hloubek vložených defektů. Dále bylo opraveno několik málo bodů, ve kterých software špatně vyhodnotil rozhraní zadní stěny. Použitý program také mimo jiné umožňuje zobrazit plošný sken jen v určitém rozsahu hloubek, respektive časů. Na obr. 50 byla tato funkce využita pro zobrazení pouze horní vrstvy vložených defektů.



**Obr. 49:** Plošný sken s lokalizovanými defekty na celou tloušťku bloku



**Obr. 50:** Plošný sken s horní vrstvou umělých defektů

## 7.4 GEORADAR

Experimentální měření bylo postupně provedeno třemi různými georadary. Nejprve byl použit georadar od společnosti GSSI, který umožňuje zapojení antén o různých frekvencích od 16 MHz po 2,6 GHz. Následoval georadar značky Hilti a na závěr georadar od firmy Proceq. Podle rovnice (5) lze určit teoretické vertikální rozlišení (tab. 4). Do rovnice je potřeba dosadit periodu pulsu, která odpovídá převrácené hodnotě frekvence antény a relativní permitivitě prostředí. Při výpočtu byla použita hodnota relativní permitivity 7,7 stanovená při měření na betonovém bloku.

Firma Proceq uvádí u svého georadaru široký rozsah frekvencí od 0,2 do 4,0 GHz. Otázkou je, do jaké míry tento rozsah odpovídá realitě a zda je opravdu využitelný, nebo se jedná pouze o reklamní trik. Výrobce prohlašuje, že jeho zařízení dokáže obstát ve všech aplikacích, pro které je jinak nutné používat antény v rozsahu 0,9 až 3,5 GHz. Pro výpočet teoretického vertikálního rozlišení georadaru Proceq byla tedy použita frekvence 3,5 GHz, pokud budeme předpokládat, že je prohlášení firmy pravdivé.

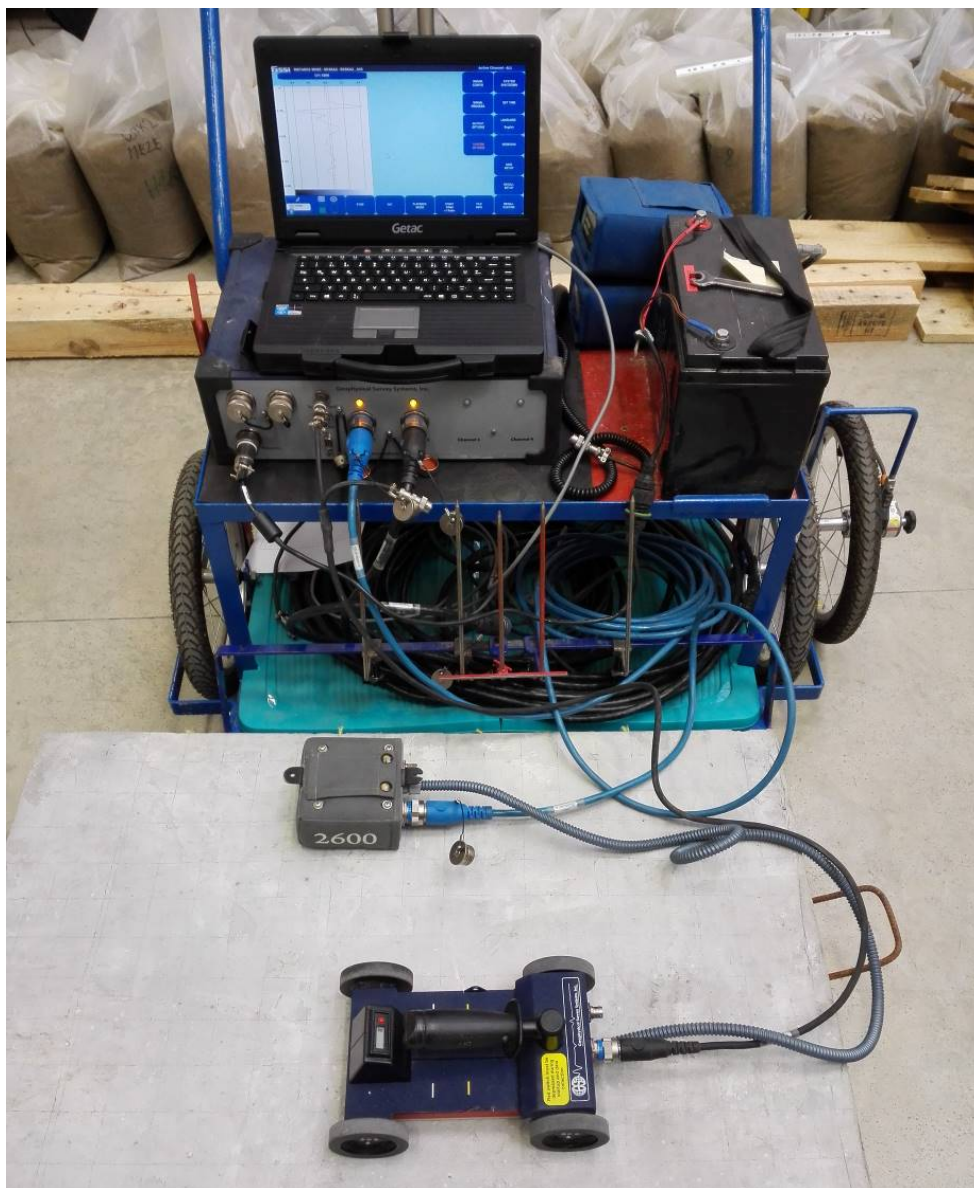
**Tabulka 4:** Parametry použitých georadarových antén

Veličina	GSSI 1,6 GHz	GSSI 2,6 GHz	Hilti PS 1000	Proceq GP8000
Frekvence	1600 MHz	2600 MHz	1500 MHz	3500 MHz
Perioda pulsu	0,625 ns	0,385 ns	0,667 ns	0,286 ns
Vlnová délka	0,068 m	0,042 m	0,072 m	0,031 m
Vertikální rozlišení	0,034 m	0,021 m	0,036 m	0,015 m

### 7.4.1 Georadar GSSI

Jako první byl při měření použit georadar od americké společnosti GSSI. Tento georadar je složený z řídicí jednotky SIR-30 s množstvím portů, do kterých je možné mimo antén a přenosného počítače, zapojit také odometr, GPS anténu či marker. Měření bylo postupně provedeno na obou stranách zkušebního bloku s využitím dipólových antén s centrální vysílací frekvencí 1,6 a 2,6 GHz. Antény byly při měření vedeny po vyznačených liniích na betonovém bloku s pomocí měřicího vozíčku (obr. 51).

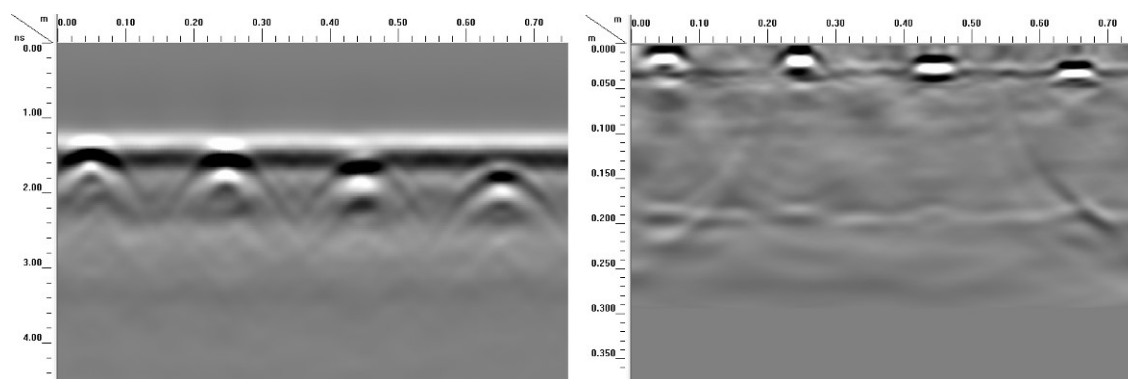
Přes ovládací notebook lze nastavit řadu parametrů měření, jako je krok měření, čas průchodu signálu, zisk antény (gain) atd. Při experimentu byl zvolen krok měření 1 mm, čemuž odpovídá 1000 skenů na 1 m. Čas průchodu, po který anténa zaznamenává odražený signál, byl nastaven podle rovnice (4), aby s určitou rezervou odpovídal tloušťce betonového bloku.



**Obr. 51:** Měřicí jednotka georadaru GSSI a 2,6 GHz anténa v měřicím vozíčku

Rozměry měřicího vozíčku neumožňovaly zahájit měření na hraně bloku, navíc by boční strana betonového bloku pravděpodobně odrážela signál a zkreslovala tím měření. Měření tedy začínalo 15 cm od okraje panelu a končilo 10 cm před koncem bloku. Tímto způsobem byla změřena plocha  $75 \times 75$  cm ve středu panelu, což stačilo na pokrytí všech umělých defektů. Nejprve byla změřena strana A panelu, následně byl panel otočen a byla změřena i strana B. Měření probíhalo na připravené mřížce v liniích po 5 cm.

Po změření všech linií ve směru x a y byla surová data přenesena do počítače a zpracována v programu RADAN 7 (také od společnosti GSSI). Pro každou anténu a stranu bloku byl vytvořen jeden 3D soubor sloučením 32 radarogramů (16 ve směru x a 16 ve směru y). Další úpravy spočívaly v nastavení tzv. „času nula“ (time-zero). To se provedlo vertikálním posunutím celého profilu tak, aby se měřený povrch bloku nacházel v čase nula. Následovala aplikace filtru „Background Removal“ k odstranění šumu a nežádoucích odrazů. Nakonec byla použita funkce migrace k převedení původních difrakčních hyperbol na skutečné geometrické tvary (obr. 52).



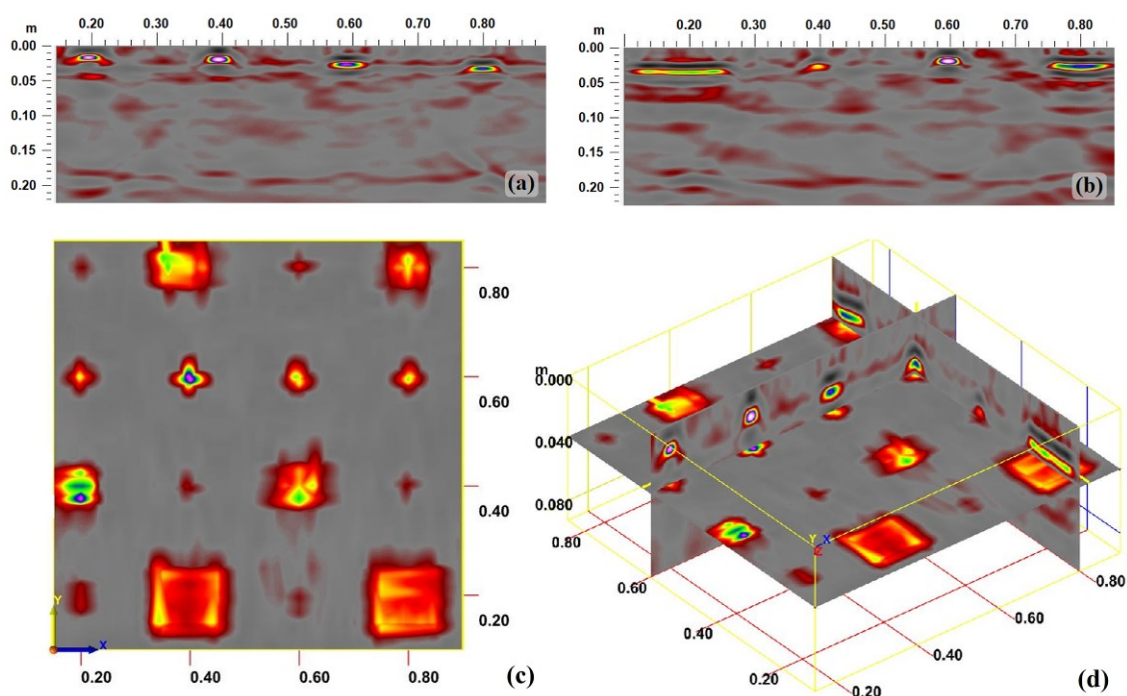
**Obr. 52:** Zpracování radarogramů: před úpravou (vlevo) a po úpravě (vpravo)

I přes malou hloubku některých vložených defektů, bylo možné v softwaru vyhodnotit jejich polohu. Na liniovém skenu (radarogramu) měřeném ve směru x pomocí 2,6 GHz antény lze dobře rozlišit čtyři objekty o stejné velikosti (obr. 53a). Na obr. 53b je zobrazen další radarogram, tentokrát se jedná o liniový sken ve směru y. Všechny umělé defekty pod povrchem strany A betonového bloku je možné sledovat na plošném skenu (obr. 53c) a na 3-D pohledu (obr. 53d).

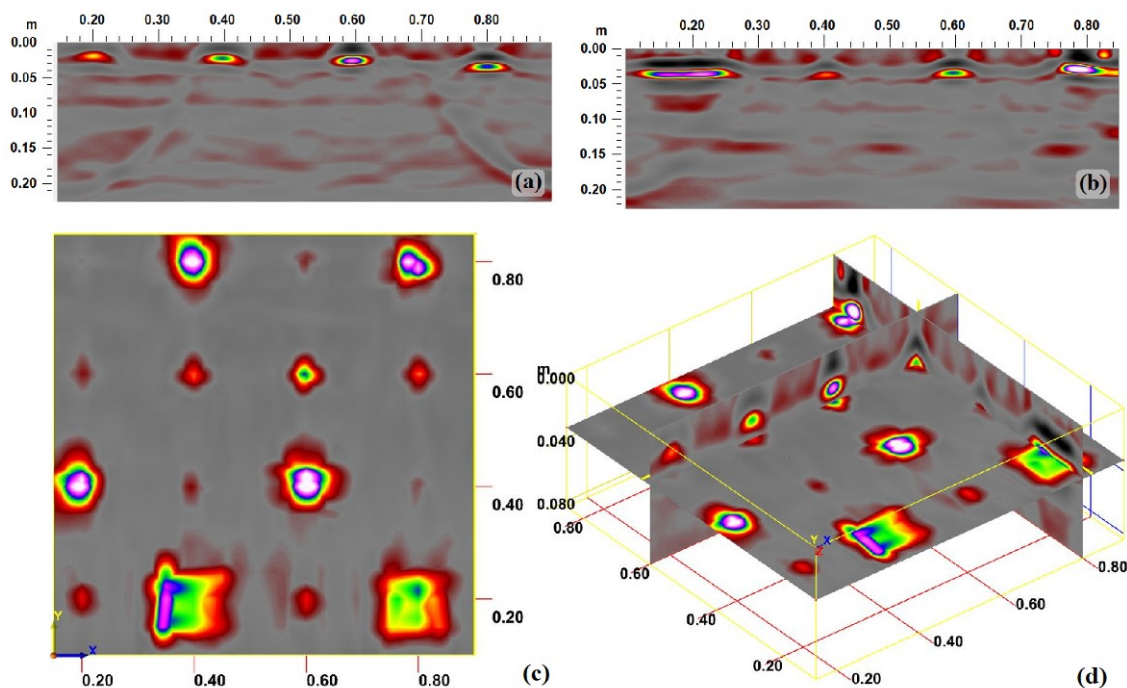
Podobné výsledky byly získány také pomocí 1,6 GHz antény (obr. 54a-d). Ve srovnání s 2,6 GHz anténou se však tyto radarogramy jeví jako méně ostré. Důvodem je menší vertikální a horizontální rozlišení, které pramení z nižší centrální vysílací frekvence antény.

Stejným postupem bylo provedeno měření i na straně B betonového bloku. Radarogramy získané pomocí 2,6 GHz antény jsou zobrazeny na obrázcích 55a-d. Na obrázcích 56a-d jsou pak radarogramy získané pomocí 1,6 GHz antény.

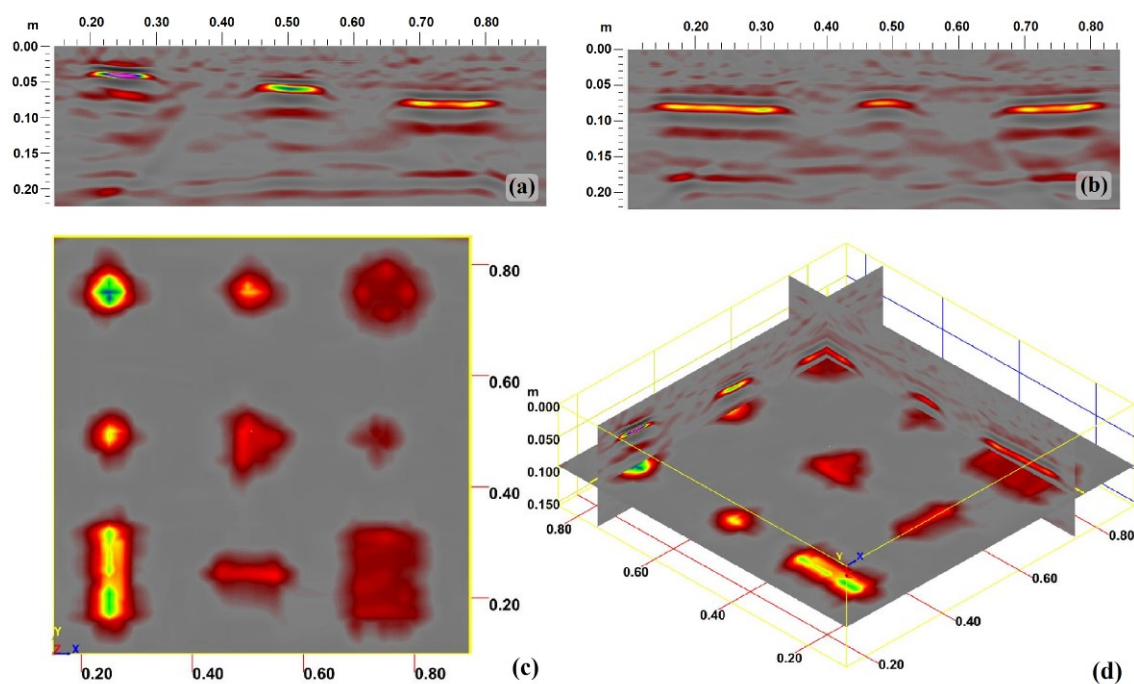




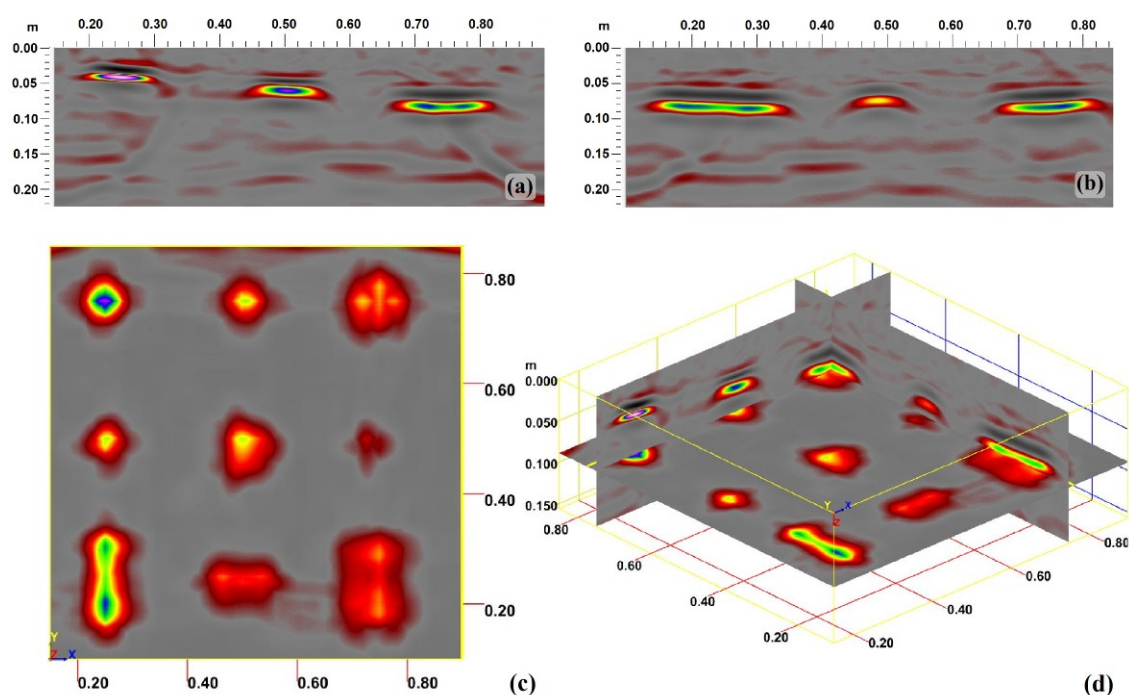
**Obr. 53:** Georadar GSSI, anténa 2,6 GHz, strana A betonového bloku: a) liniový sken ve směru x, b) liniový sken ve směru y, c) plošný sken, d) 3-D pohled



**Obr. 54:** Georadar GSSI, anténa 1,6 GHz, strana A betonového bloku: a) liniový sken ve směru x, b) liniový sken ve směru y, c) plošný sken, d) 3-D pohled



**Obr. 55:** Georadar GSSI, anténa 2,6 GHz, strana B betonového bloku: a) liniový sken ve směru x, b) liniový sken ve směru y, c) plošný sken, d) 3-D pohled



**Obr. 56:** Georadar GSSI, anténa 1,6 GHz, strana B betonového bloku: a) liniový sken ve směru x, b) liniový sken ve směru y, c) plošný sken, d) 3-D pohled

## 7.4.2 Georadar Hilti PS 1000

Měření s georadarem Hilti PS 1000 nebylo jako jediné provedeno v prostorech Centra dopravního výzkumu, v. v. i., ale v laboratoři Ústavu stavebního zkušebnictví FAST VUT. Měření bylo z časových a technických důvodů provedeno jen ze strany A betonového zkušebního bloku.

Georadar Hilti (obr. 57) je primárně určen k lokalizaci výztuže nebo kabelových kanálků, jeho hloubkový dosah se pohybuje mezi 30 a 40 cm. Přístroj má kompaktní rozměry, jednoduché, uživatelsky přívětivé rozhraní a na rozdíl od georadaru GSSI ho lze charakterizovat slovy „vše v jednom“. Měření lze provádět ve dvou režimech. Prvním je rychlý sken, kdy se provádí měření v jedné linii a data se zobrazují přímo na displeji přístroje.

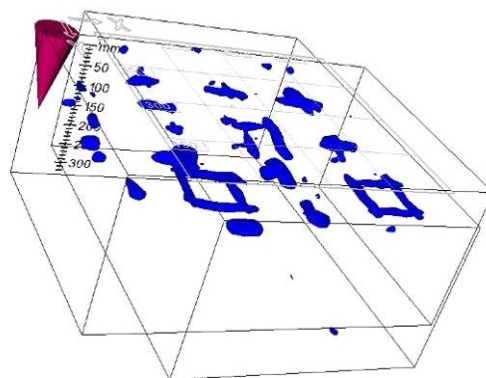
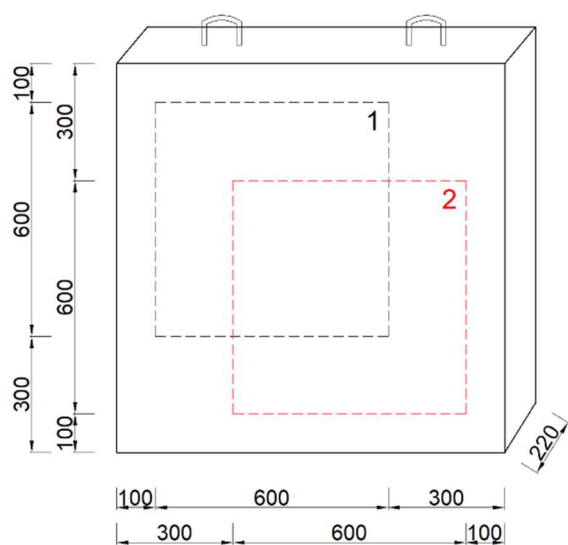
Druhý režim je plošný sken. Před jejich měřením se na povrch konstrukce nejprve lepí papírové šablony s rastrovými pojedy. Díky tomu není potřeba rýsovat mřížku na povrch konstrukce. Výrobce dodává ke georadaru dvě velikosti šablon o rozměrech 60 × 60 cm a 120 × 120 cm. Přístroj je vybavený třemi anténami, což mu umožňuje při jednom přejezdu změřit plochu o šířce 15 cm. Při měření na menší šabloně tedy stačí provést pouze 4 přejezdy v horizontálním a 4 přejezdy ve vertikálním směru (v případě větší šablony 8 + 8 přejezdů). Pořadí jednotlivých přejezdů je označeno na šabloně. Ihned po skončení měření je možné provést analýzu skenů přímo na displeji přístroje. Kromě plošného skenu jsou zde zobrazeny i řezy ve směru x a y. V případě plošného skenu je možné definovat, pro jakou hloubku bude tento plošný sken vykreslen.



*Obr. 57: Georadar Hilti PS 1000*

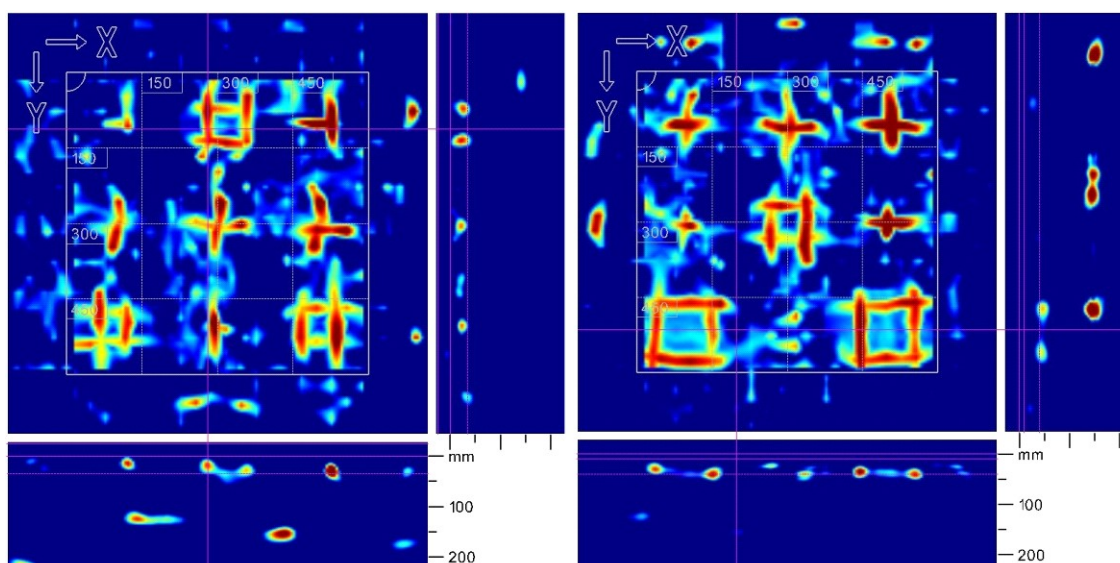


Při měření na betonovém bloku byla použita šablona o rozměrech  $60 \times 60$  cm, která však nepokryla celou jeho plochu, proto byla šablona po změření první části bloku umístěna na dalším místě a byla provedena ještě jedna sada měření. Na obr. 58 je znázorněno schéma měření, které bylo zvoleno tak, aby byla pokryta většina umělých defektů během dvou sad měření. Měření probíhalo rychle, ale jak lze pozorovat na obr. 60, georadar Hilti nevyhodnotil umělé defekty jako plochy, ale jako prutové prvky. Ukázalo se, že tento georadar dělá přesně to, k čemu byl navržen, tedy lokalizuje výztuž. Bohužel tak činí i u prvků, které výztuž nejsou. Nicméně polohu vložených defektů i jejich hloubku lze z pořízených radarogramů relativně dobře určit. Další možnost, jak vizualizovat naměřená data, je prostorový pohled (obr. 59).



**Obr. 58:** Schéma měření – čtvercová plocha 1 a 2

**Obr. 59:** 3-D pohled – měřená plocha 2



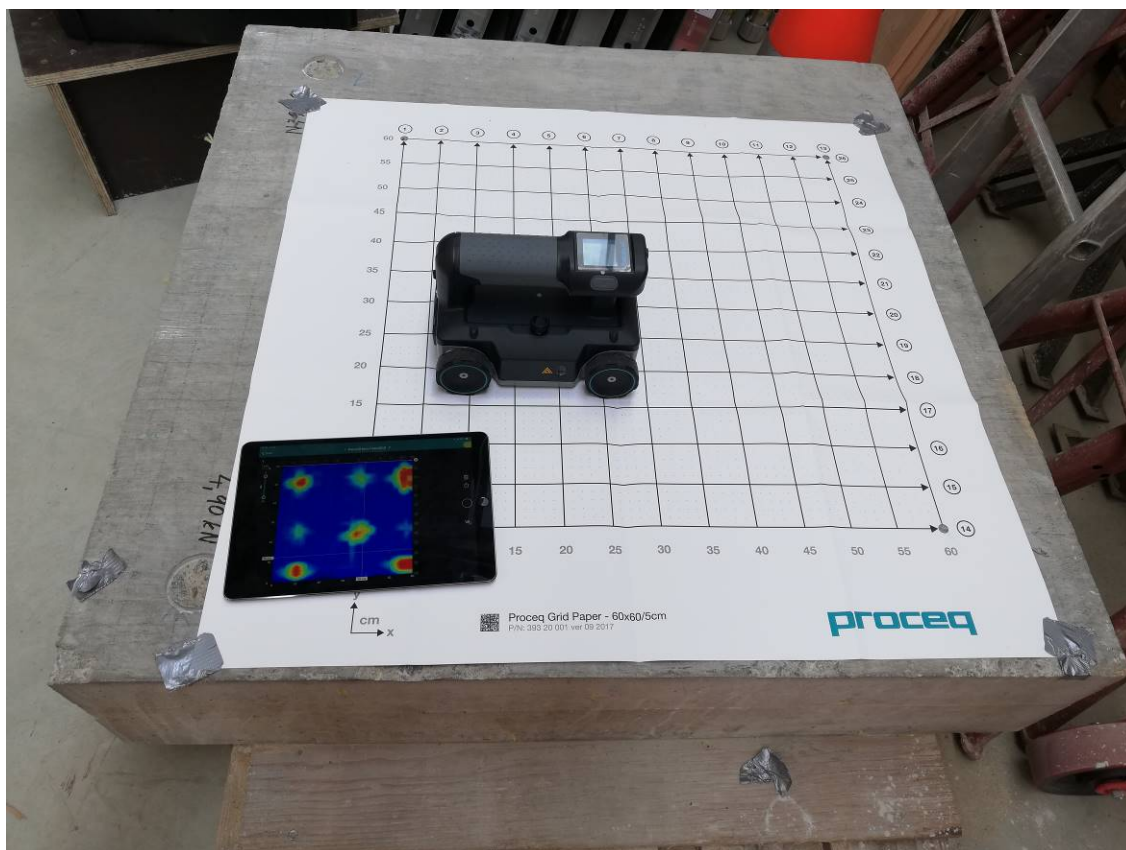
**Obr. 60:** Plošný sken: měřená čtvercová plocha 1 (vlevo) a 2 (vpravo)



### 7.4.3 Georadar Proceq GP8000

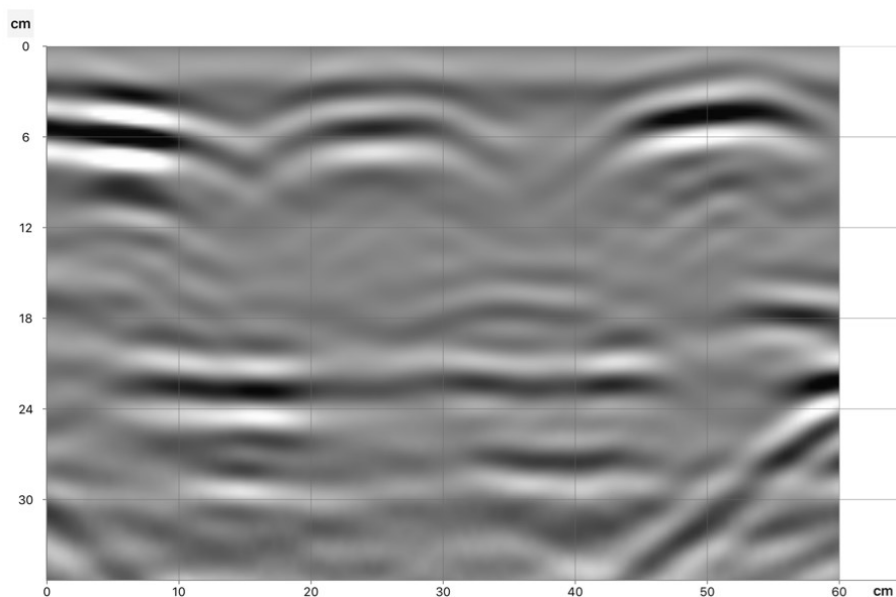
V červnu roku 2019 zakoupilo CDV nový georadar Proceq GP8000. Tento přístroj lze považovat za přímého konkurenta georadaru PS 1000 od Hilti. Ve srovnání s ním však může provádět měření do hloubek až 0,8 m díky širokopásmové anténě o frekvenci 0,2-4,0 GHz. Díky tomu je možné použít georadar Proceq pro širší okruh aplikací než konkurenční georadar Hilti. Ve srovnání s ním naopak trochu zaostává v rychlosti provádění měření, protože obsahuje jen jednu anténu, zatímco georadar Hilti má tři, což mu umožňuje během jednoho přejezdu pokrýt širší plochu.

Georadar Proceq má podobně jako georadar Hilti tvar ručního vozíčku. Chybí mu však barevný displej, který je nahrazen přes Wi-Fi připojeným tabletem iPad (obr. 61) od společnosti Apple. Na displeji tabletu se nastavují veškeré parametry měření, zároveň složí k prohlížení naměřených dat. Georadar Proceq má také dva základní měřicí módy: liniový a plošný sken. K měření plošného skenu slouží podobně jako u georadaru Hilti papírová šablona, která se lepí na zkoumanou konstrukci. Stejný je i jediný rozměr šablony  $60 \times 60$  cm, kterou v současnosti firma Proceq nabízí. Šablony jsou dostupné ve dvou variantách a liší se podle požadované přesnosti měření. První šablona má rastr 5 cm a na její změření je potřeba provést 13 přejezdů v horizontálním směru a stejný počet přejezdů ve směru vertikálním, celkem tedy 26. Na druhé šabloně se měření provádí po liniích vzdálených 10 cm od sebe. Pro změření celé plochy je v tomto případě potřeba provést v každém směru 7 měření (celkem 14).

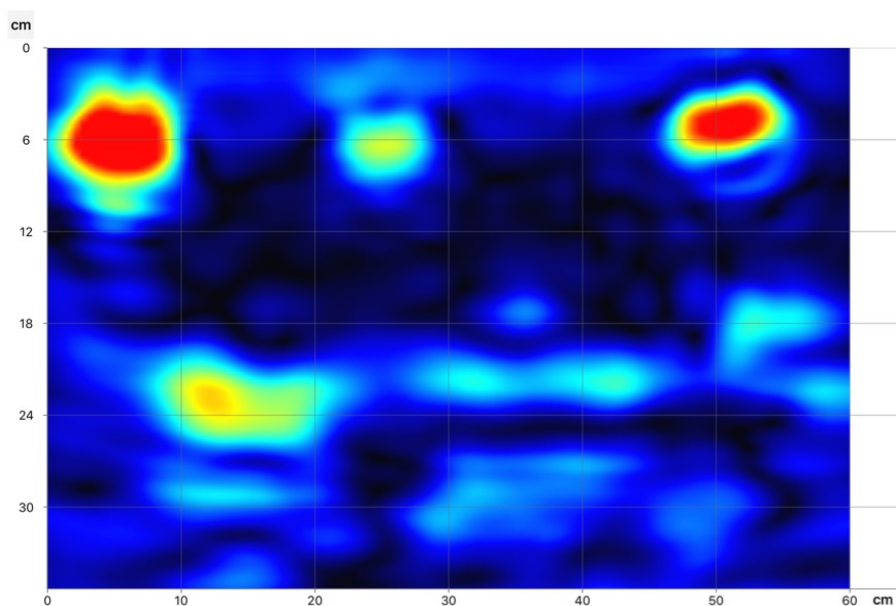


**Obr. 61:** Georadar Proceq GPR Live na zkušebním bloku

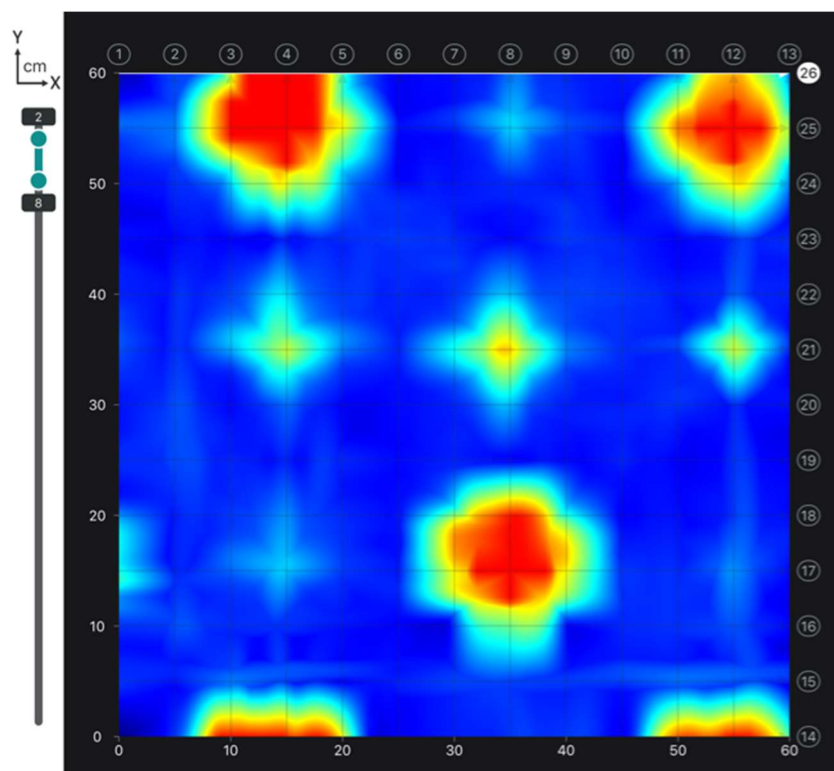
Před měřením lze pomocí tabletu nastavit počet skenů na jeden cm. Na výběr jsou tři možnosti: 0,5, 1 nebo 2 skeny/cm. Dále je potřeba vybrat, zda preferujeme rychlejší měření nebo naopak možnost měřit do větší hloubky. Po spuštění se okamžitě s pohybem měřicího vozíčku začne na tabletu vykreslovat radarogram. Zde je možné přepínat mezi originálním (obr. 62) a průběžně zpracovávaným záznamem (obr. 63) bez původních hyperbol. V průběhu měření nebo až po jeho ukončení lze upravovat zisk antény (dB) a časovou kompenzaci zisku (dB/m). Po ukončení měření je možné radarogramy okamžitě z měřicího tabletu odeslat na libovolný e-mail prostřednictvím mobilního internetového připojení případně s pomocí Wi-Fi. Jako jistá slabina se může jevit absence vyhodnocovacího softwaru pro počítače s operačním programem Windows.



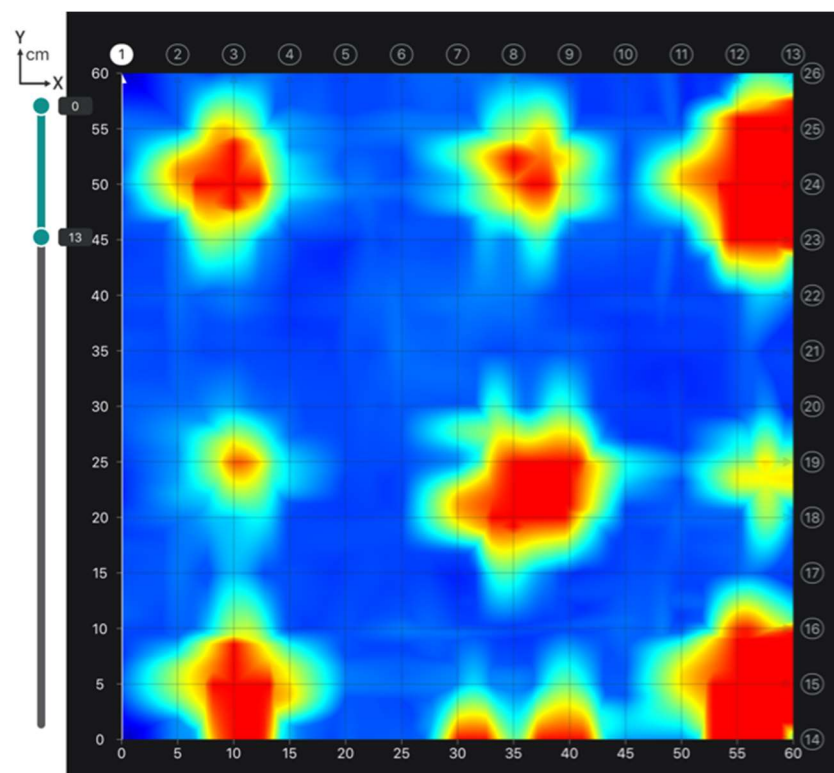
**Obr. 62:** Neupravený liniový sken – strana B betonového bloku, měřeno ve směru y



**Obr. 63:** Liniový sken po automatické úpravě – strana B, měřeno ve směru y

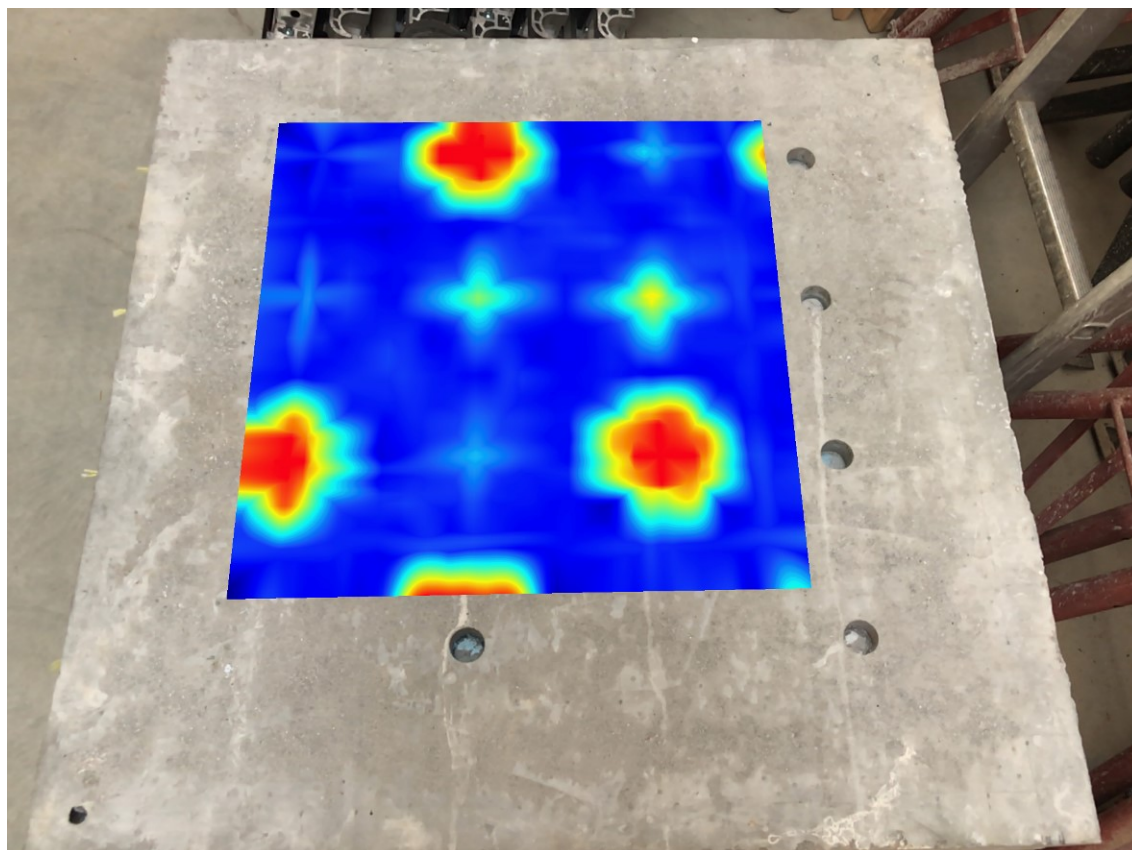


**Obr. 64:** Plošný sken – strana A, měřeno v pravém horním rohu



**Obr. 65:** Plošný sken – strana B, měřeno v levém horním rohu





**Obr. 66:** Zobrazení plošného skenu na povrchu zkušebního bloku s využitím rozšířené reality (snímek obrazovky tabletu)

Jelikož jsme v CDV pořídili georadar Proceq teprve v roce 2019, a ne zcela plánovaně, nenacházel se již zkušební blok ve 100% stavu. Několik měsíců před nákupem tohoto georadaru byly totiž z betonového bloku odebrány jádrové mikro-vývrty a provedeny odtrhové zkoušky. Jádrové vývrty o průměru 29 mm byly odebrány v místech vložených umělých defektů za účelem určení jejich skutečných hloubek. Naštěstí se při vrtání rozpadly jen dva nejtenčí vývrty. Ostatní vývrty, které zůstaly zachovány, byly před měřením zasunuty zpět na původní místa. Otvory po odtrhových zkouškách se nacházely pouze na okraji betonového bloku a neměly vliv na georadarové měření.

Ke změření zkušebního betonového bloku byla využita šablona s rastrem  $5 \times 5$  cm. Rozměry šablony  $60 \times 60$  cm neumožňovaly ideálně změřit celou jednu stranu zkušebního bloku naráz, proto bylo provedeno opakované měření s různým umístěním šablony. Šablona byla při měření vždy přichycena v rohu betonového bloku, 15 cm od obou okrajů. Takto bylo provedeno měření na straně A (obr. 64) a po otočení betonového bloku i na straně B (obr. 65). Výsledky lze také vizualizovat prostřednictvím 3-D pohledu nebo pomocí tzv. rozšířené reality (obr. 66). Tablet v tomto režimu virtuálně promítne na povrch konstrukce to, co se nachází pod ním. Aby se dokázal tablet „chytil“ a promítnout sken do správného místa, je potřeba na střed šablony nebo na její původní místo umístit speciální značku. Použití tohoto režimu je praktické především při vrtání do konstrukce, kdy je potřeba vyhnout se výztuži.

## 7.5 TERMOKAMERA

Pomocí termokamery byla zkoumána možnost detekovat podpovrchové defekty na základě teplotních kontrastů vznikajících na povrchu betonové konstrukce při změně okolní teploty. Za tímto účelem byl betonový zkušební blok převezen z laboratoře na dvůr CDV. Při prvním experimentu se betonový blok nacházel na trvale stíněném místě. Následně byl převezen o cca 20 m jinam. Na novém místě byl již blok během měření vždy část dne vystaven slunečnímu záření. Při měření byly střídavě použity dvě termokamery FLIR: A615 (obr. 67) a E60bx. Jejich parametry jsou uvedeny v tabulce 5.

Termokamery byly upevněny ve stativu vzdáleném 2-3 m od zkoumaného betonového bloku a v pravidelných 5minutových intervalech prováděly měření. Snímání takto probíhala vždy několik dní vkuse. Data byla ukládána jako jedna dlouhá sekvence. Díky tomu z nich bylo následně možné získat graf průběhu teplot v čase pro libovolný bod na povrchu zkušebním bloku.



**Obr. 67:** Termokamera FLIR A615

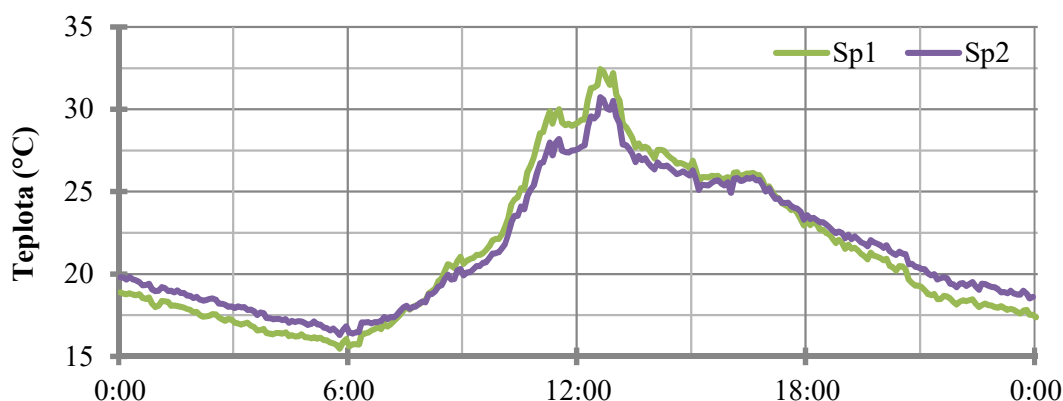
**Tabulka 5:** Parametry použitých termokamer

Parametry	FLIR A615	FLIR E60bx
Rozlišení	640 × 480 pixelů	320 × 240 pixelů
Teplotní citlivost	<0,05 °C při +30 °C	<0,045 °C při +30 °C
Spektrální rozsah	7,5-14 μm	7,5-13 μm
Teplotní rozsah	-40 °C až 2000 °C	-20 °C až 120 °C
Přesnost	±2 °C nebo ±2 %	±2 °C nebo ±2 %

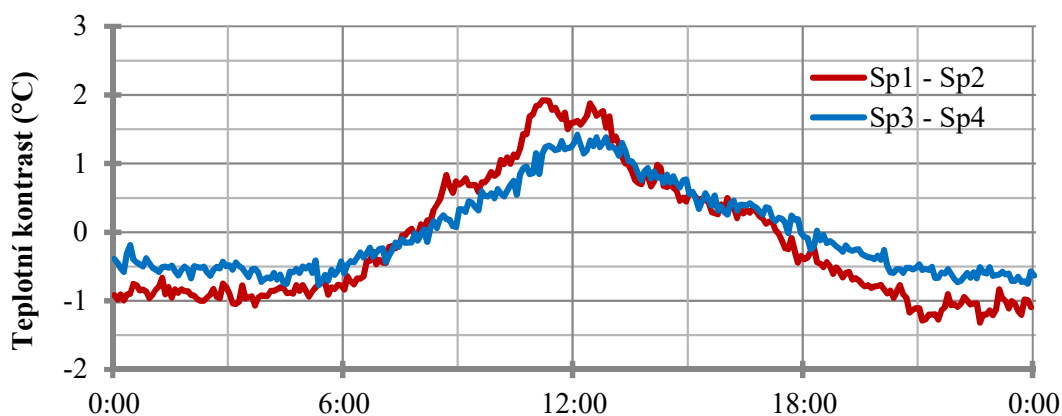
### 7.5.1 Měření ve stínu

První měření zkušebního bloku bylo provedeno v létě roku 2016 s pomocí termokamery FLIR E60bx. Na jaře roku 2018 pak bylo měření zopakováno s využitím termokamery FLIR A615. Oběma termokamerami byly dosaženy srovnatelné výsledky. V této kapitole jsou uvedeny hodnoty naměřené s pomocí termokamery FLIR A615, termogramy pořízené druhou termokamerou jsou uvedeny v příloze. Měření probíhalo za různých klimatických podmínek. Nejlepších výsledků bylo dosaženo během slunečných dní s relativně chladnými rány a následným oteplením až o 15 °C, kdy se odpolední teplota vzduchu pohybovala i přes 30 °C. V těchto dnech se teplota povrchu nad vloženými defekty na straně A betonového bloku lišila až o 2 °C v porovnání s okolní teplotou.

Graf na obr. 68 zobrazuje zdánlivou teplotu jako funkci času pro bod na povrchu betonového bloku umístěný nad vloženým defektem a označeným jako Sp1 a pro okolní bod, označený jako Sp2 (obr. 70-72). Graf zobrazuje interval 24 hodin jednoho květnového dne roku 2018. Teplotní kontrasty mezi povrchy s umělými defekty a okolím bez defektů byly stanoveny jako rozdíly zdánlivých teplot měřených v bodech Sp1-Sp2 a Sp3-Sp4 (obr. 69). Následný odběr jádrových mikro-vývrtů ukázal, že tloušťka betonové vrstvy v bodě Sp1 byla 19 mm, v bodě Sp3 pak 26 mm.

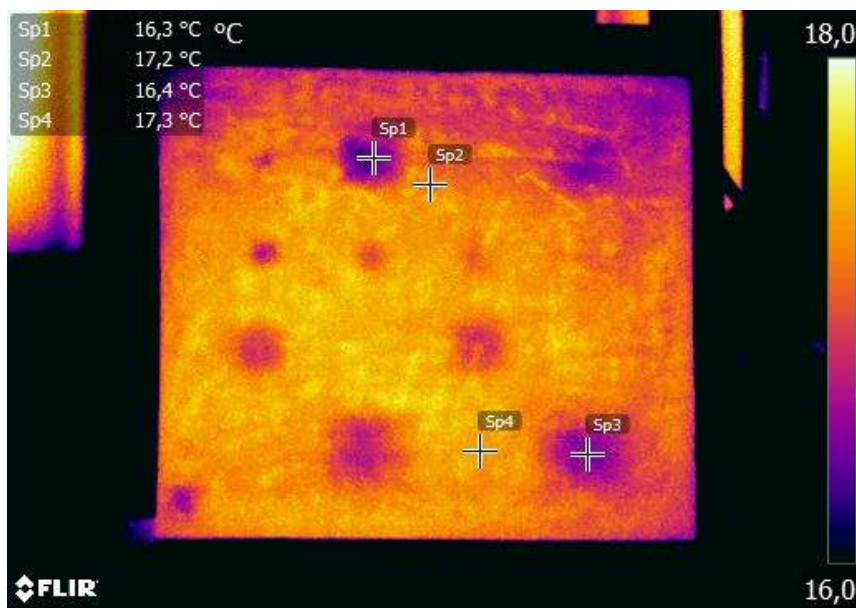


**Obr. 68:** Graf průběhů teplot ve stínu, strana A betonového bloku

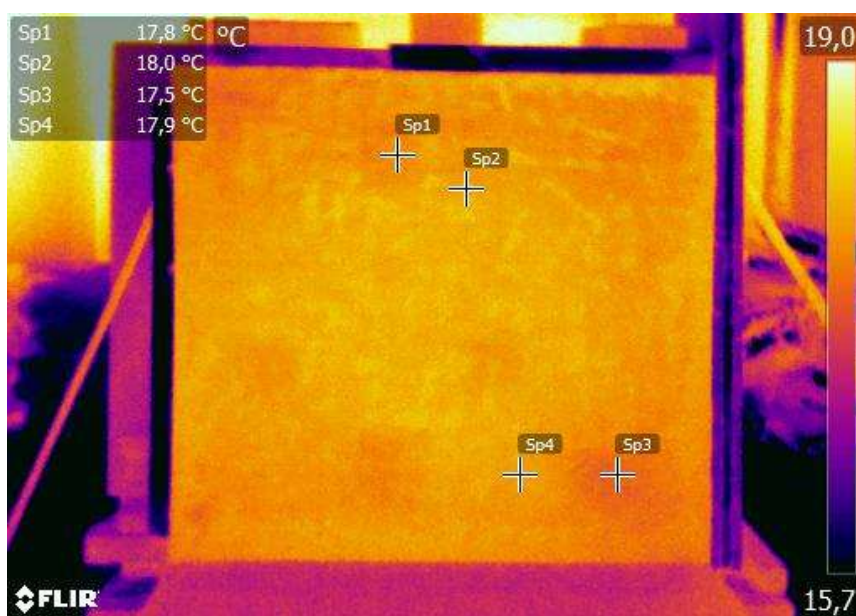


**Obr. 69:** Graf teplotních kontrastů ve stínu, strana A betonového bloku

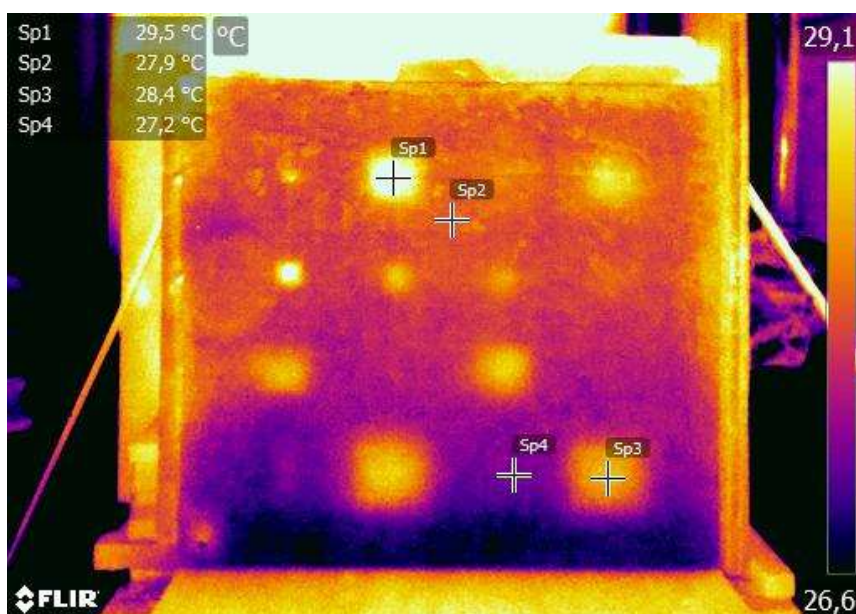




**Obr. 70:**  
Termogram  
zkušebního  
betonového bloku  
(strana A), čas  
měření 5:00



**Obr. 71:**  
Termogram  
zkušebního  
betonového bloku  
(strana A), čas  
měření 8:00



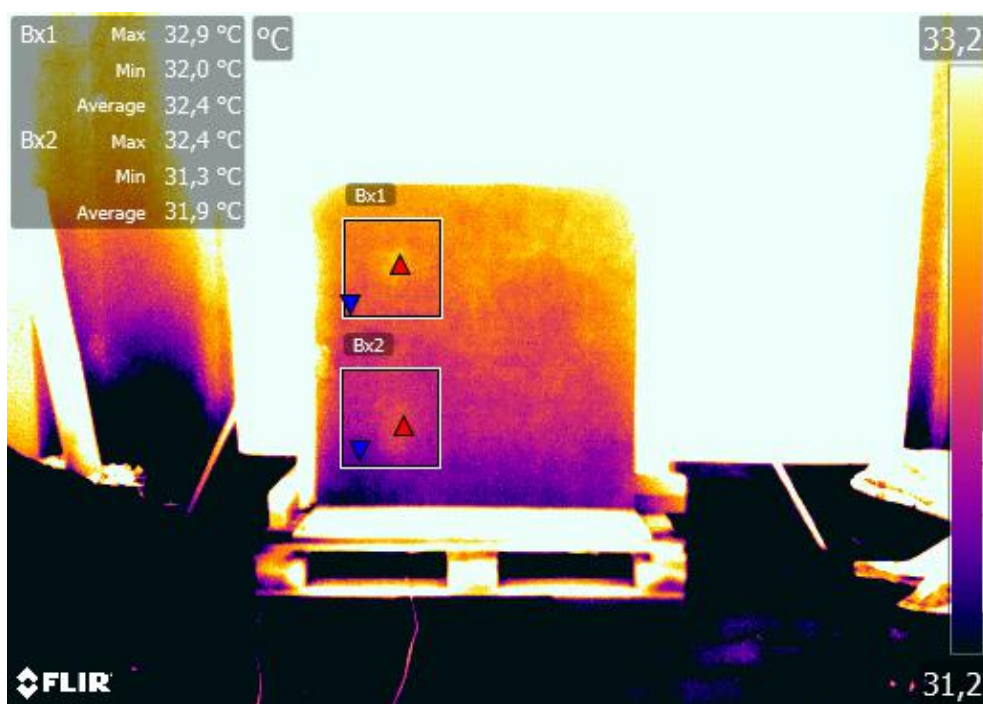
**Obr. 72:**  
Termogram  
zkušebního  
betonového bloku  
(strana A), čas  
měření 12:00

Velký vliv na hodnotu teplotního kontrastu má nejen absolutní rozdíl minimální a maximální denní teploty, ale také rychlost samotného oteplování/ochlazování. Z grafu na obr. 68 je patrné, že minimální teploty bylo dosaženo kolem šesté hodiny ranní, zatímco maximální přibližně hodinu po poledni. Oteplování tedy trvalo přibližně 7 hodin ( $\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ ), zatímco ochlazování zhruba 15 hodin ( $\sim 1\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ ). Dvojnásobné rychlosti oteplování v porovnání s rychlostí ochlazování odpovídá i zhruba dvakrát větší hodnota pozitivního teplotního kontrastu ve dne ve srovnání s negativním teplotním kontrastem v noci (obr. 69). Na velikost teplotního kontrastu má samozřejmě vliv i hloubka a velikost samotného podpovrchového defektu nebo delaminace.

Termogram (obr. 72) pořízený v čase 12:00 ukazuje pozitivní teplotní kontrast, kdy je teplota betonového povrchu nad umělým defektem vyšší než v okolí. Další termogram z 5. hodiny ranní (obr. 70) zachycuje negativní teplotní kontrast, zde je naopak betonový povrch nad vloženými defekty chladnější než okolí.

Pokud se teplota během dne nijak výrazně nemění, dojde i k ustálení teploty betonové konstrukce. V takovém případě je obtížné nebo zcela nemožné pozorovat podpovrchové defekty pomocí termokamery, typicky takové podmínky nastávají při podzimních inverzích. K podobnému efektu dochází i v časových intervalech, které následují po změně fáze oteplování na fázi ochlazování a obráceně. U provedeného měření se tento efekt projevil ráno okolo času 8:00 (obr. 71) a v podvečer v 17:30, kdy se hodnota teplotního kontrastu blížila  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Měření bylo prováděno i na straně B betonového bloku. Podpovrchové defekty se však na této straně nacházely ve větší hloubce a v našich podmínkách je téměř nebylo možné pomocí termokamery zachytit. Nakonec se podařilo změřit jen dva vložené defekty, které se nacházely v hloubce cca 5 cm (obr. 73).



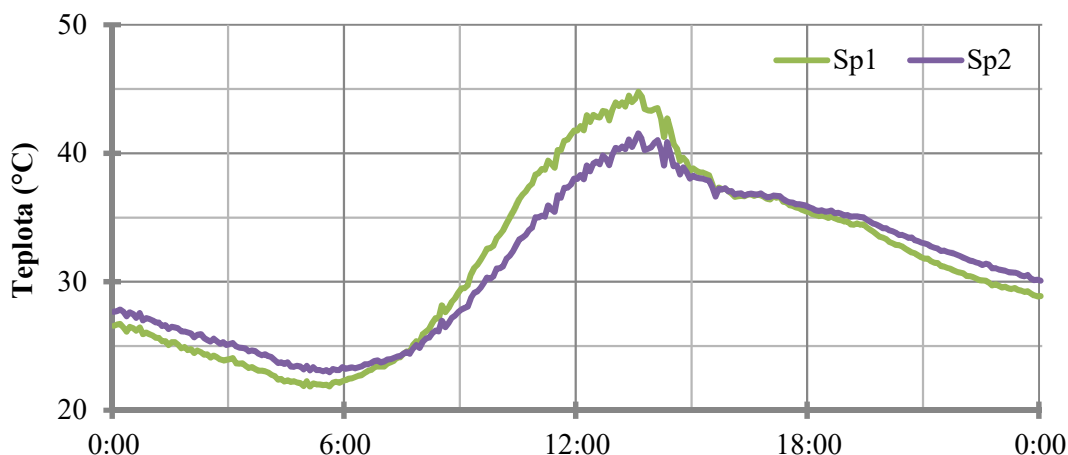
*Obr. 73: Termogram strany B betonového zkušební bloku*



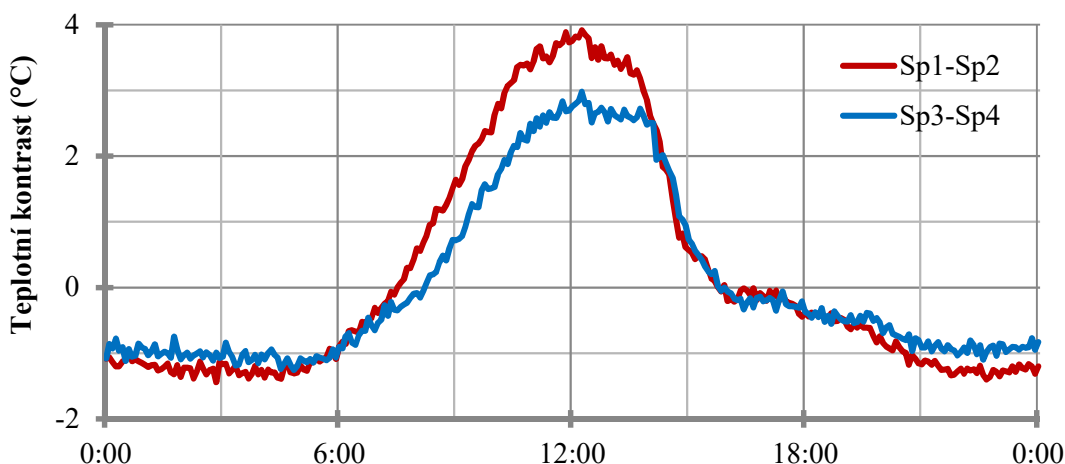
## 7.5.2 Měření na slunci

Měření betonového bloku umístěného na slunci bylo realizováno v létě roku 2016 pomocí termokamery FLIR E60bx. Strana A betonového bloku desky byla orientována přibližně jihovýchodním směrem a sluneční záření na ni dopadalo cca mezi 8. a 14. hodinou. Nejlepších výsledků bylo dosaženo za bezmračných dnů, kdy dosahovala intenzita slunečního záření maximálních hodnot.

Graf na obr. 74 zobrazuje průběh zdánlivých teplot pro body Sp1 a Sp2 na povrchu betonového zkušebního bloku během jednoho dne. Měřené body byly ve stejném rozložení jako při měření ve stínu. Na slunci se však betonový povrch ohříval rychleji. Vyšších hodnot dosahovaly i maximální povrchové odpolední teploty. Rozdíl ranních a poledních teplot se v některých dnech pohyboval i kolem 20 °C. Také maximální teplotní kontrast mezi bodem Sp1 nad vloženým defektem a bodem Sp2 mimo defekt dosahoval až 4 °C (obr. 75). Kontrast mezi body Sp3 a Sp4 je o něco nižší kvůli větší tloušťce betonové vrstvy nad umělým defektem.

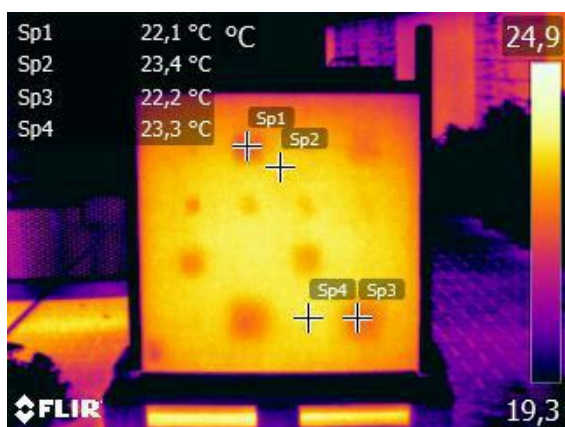


**Obr. 74:** Graf průběhů teplot na slunci, strana A betonového bloku

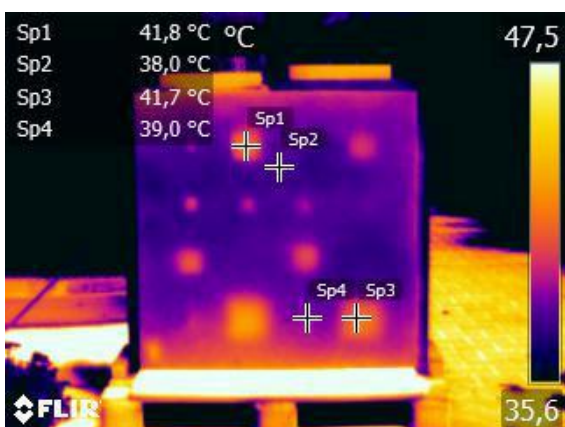


**Obr. 75:** Graf teplotních kontrastů na slunci, strana A betonového bloku

Na obr. 76 je termogram vytvořený v 5:00 ráno, kdy dosáhla betonová deska nejnižší teploty během zkoumaného dne. V tuto dobu se blížil k maximu i negativní teplotní kontrast. Obrázek 77 ukazuje termogram z 12. hodiny, v tuto dobu byl zaznamenán maximální pozitivní kontrast. Kolem osmé hodiny ranní pak přechází negativní teplotní kontrast na pozitivní, ve čtyři hodiny odpoledne nastává opak (obr. 78). V tuto dobu není na betonovém povrchu zkušebního bloku patrný žádný teplotní kontrast a nelze tedy pomocí termokamery rozeznat defekty pod povrchem.



**Obr. 76:** Termogram betonového bloku, čas měření 5:00



**Obr. 77:** Termogram betonového bloku, čas měření 12:00



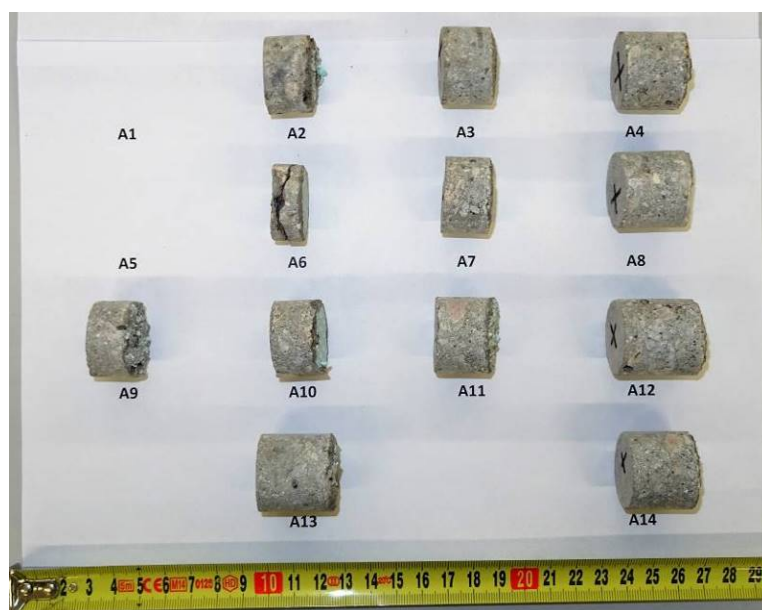
**Obr. 78:** Termogram betonového bloku, čas měření 16:00

## 7.6 ODBĚR JÁDROVÝCH MIKRO-VÝVRTŮ

Po provedení všech nedestruktivních měření (mimo georadaru Proceq), byly odebrány jádrové mikro-vývrty za účelem stanovení skutečné hloubky vložených defektů. K vrtání byla použita výkonná jádrová vrtačka s vodním chlazením a vakuovým uchycením, takže nebylo potřeba vrtat otvory pro kotvící šrouby. Při vrtání byl použit jádrový vrták s vnitřním průměrem 29 mm, vrty byly vedeny v předpokládaných středech vložených defektů. Odběr jádrových vývrtů byl proveden nejprve na straně A betonového bloku a následně i na straně B, poté byla změřena jejich tloušťka (délka). Dva nejtenčí mikro-vývrty se při vrtání rozpadly, proto byla určena poloha umělého defektu pod nimi z hloubky vzniklého otvoru.



*Obr. 79: Odběr jádrových mikro-vývrtů ze strany B betonového bloku*



*Obr. 80: Jádrové mikro-vývrty ze strany A betonového bloku*



**Obr. 81:** Jádrové mikro-vývrty ze strany B betonového bloku

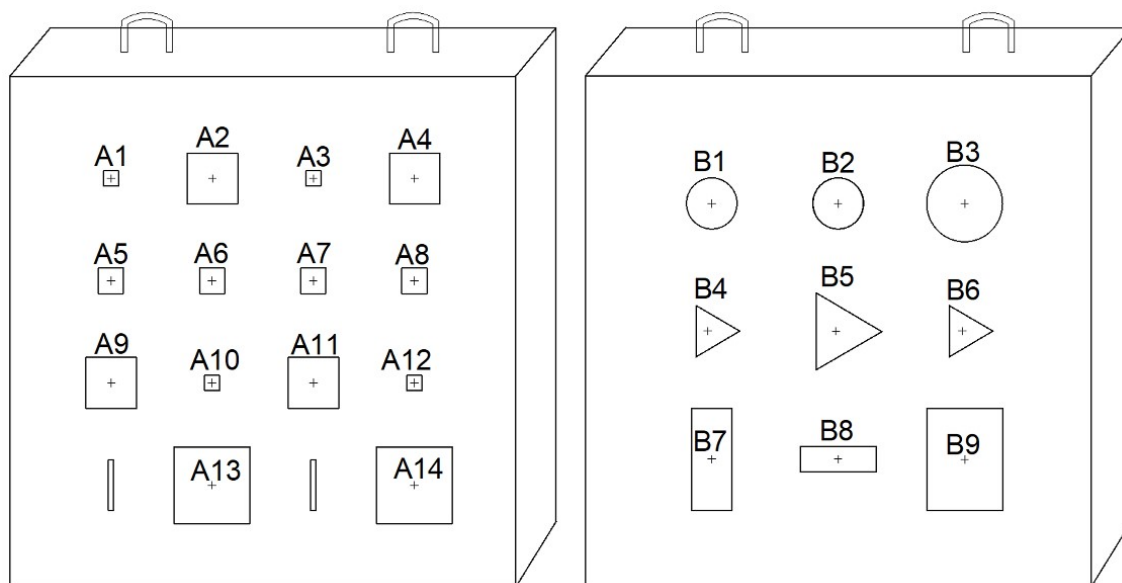
## 7.7 POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH HLOUBEK

Po odebrání jádrových vývrtů mohlo být konečně provedeno porovnání hloubek umělých defektů stanovených nedestruktivními metodami. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulkách 6 a 7. Číslování umělých defektů je zobrazeno na obrázku 82.

V porovnání chybí kromě tvrdoměrných metod a UZ metody průchodové také IR termografie, která se běžně k určování hloubek nepoužívá. Nicméně platí, že čím hlouběji je defekt, tím nižší je hodnota teplotního kontrastu na povrchu. Tato závislost je patrná i na termogramech betonového panelu. Obzvláště dobře lze mezi sebou porovnávat umělé defekty A5-A8 čtvercového tvaru o straně délky 5 cm. Jak postupně klesá jejich hloubka zleva směrem doprava, snižuje se i hodnota teplotního kontrastu (obr. 70, 72, 76 a 77). Defekt zcela vlevo, označený jako A5, se nachází v hloubce 7 mm, zatímco defekt A8 (zcela vpravo) je uložený v hloubce 28 mm.

Ultrazvukový pulse-echo přístroj byl úspěšně použit jen ze strany B betonového bloku, přesto jím bylo změřeno i 6 ze 14 umělých defektů uložených ve vrstvě blíže povrchu strany A, které nebyly při měření v zákrytu (obr. 49). Pro účely porovnání byly na základě známé tloušťky panelu a polystyrenového materiálu z něhož pocházely umělé defekty, určeny jejich vzdálenosti od povrchu strany A panelu.

I přes známou rychlost šíření ultrazvukového pulsu nebyla přesnost určování hloubek příliš vysoká. Hlavně umělé defekty nacházející se blíže měřenému povrchu vyhodnocoval UZ přístroj jako hlouběji uložené, jeden dokonce určil s více než dvojnásobnou hloubkou. S narůstající hloubkou uložení se měření zpřesňovala. To platilo i pro defekty uložené ve spodní vrstvě (strana A), kdy bylo měření prováděno přes vrstvu betonu o tloušťce 17–19 cm. V tomto případě dosahovala průměrná odchylka naměřených a skutečných hloubek pouhé 4 mm.



**Obr. 82:** Číslování vložených defektů: strana A (vlevo) a strana B (vpravo)

Hodnoty hloubek získaných pomocí antén georadaru GSSI jsou velmi podobné tloušťkám jádrových vývrtů. Ve srovnání obou antén bylo přesnější měření s 2,6 GHz anténou. Průměrná odchylka naměřené a skutečné hloubky se pohybovala jen těsně nad 1 mm. Při měření s 1,6 GHz anténou činila průměrná odchylka 2,7 mm. Nicméně kdyby se do průměru nezapočítaly dvě hodnoty, které vybočily o 10 mm či více, pohybovala by se průměrná odchylka jen kolem 2 mm.

Hloubky změřené georadarem Hilti měly tendenci dosahovat nižších hodnot, než byla skutečnost. Průměrná odchylka se pohybovala těsně pod 5 mm. Důvodem menší přesnosti byla skutečnost, že georadar Hilti identifikoval vložené defekty jako výztuž a také omezená možnost kalibrace přístroje na konkrétní druh betonu.

Měření georadarem Proceq bylo z důvodů popsaných výše provedeno až po odběru jádrových mikro-vývrtů. Před měřením byly betonové válečky vývrtů zasunuty zpět do původních otvorů, nicméně k určitému ovlivnění měření jistě došlo. Jádrový vývrt nad umělým defektem A1 se při vrtání rozpadl, měření tloušťky betonové vrstvy georadarem už proto v tomto místě nebylo možné. Průměrná odchylka naměřených a skutečných hodnot činila 2,9 mm. Přesnost měření tak byla vyšší než v případě georadaru Hilti, ale nižší než u georadaru GSSI. Určitý vliv na přesnost vyhodnocení má i absence softwaru pro počítače s operačním systémem Windows. Naměřená data byla vyhodnocována v tabletu a poloha defektů byla označována prsty, což se dá považovat za méně přesné než v případě použití myši.

**Tabulka 6:** Naměřené hloubky vložených defektů pod stranou A betonového bloku

Označení umělého defektu	Hloubka (mm)					
	Pundit PL-200PE*	GSSI 1,6 GHz	GSSI 2,6 GHz	Hilti PS 1000	Proceq GP8000	Jádrový vývrt
A1	-	8	9	10	-	6
A2	14	21	20	10	21	19
A3	-	20	22	20	19	21
A4	20	29	26	21	28	25
A5	-	7	8	9	7	7
A6	-	13	16	13	12	12
A7	-	20	20	18	16	19
A8	-	28	28	22	25	28
A9	16	21	18	11	21	17
A10	-	20	19	16	19	18
A11	20	30	24	18	29	23
A12	-	35	32	30	23	31
A13	22	40	30	27	33	30
A14	23	37	28	20	29	26

\* Měřeno ze strany B

**Tabulka 7:** Naměřené hloubky vložených defektů pod stranou B betonového bloku

Označení umělého defektu	Hloubka (mm)					
	Pundit PL-200PE	GSSI 1,6 GHz	GSSI 2,6 GHz	Hilti PS 1000	Proceq GP8000	Jádrový vývrt
B1	95	40	41	35	47	41
B2	90	67	68	65	68	69
B3	107	95	93	90	96	91
B4	78	53	52	40	57	51
B5	94	76	76	65	79	76
B6	100	87	85	70	85	85
B7	77	51	50	50	51	51
B8	94	74	72	65	71	74
B9	108	95	93	90	94	92

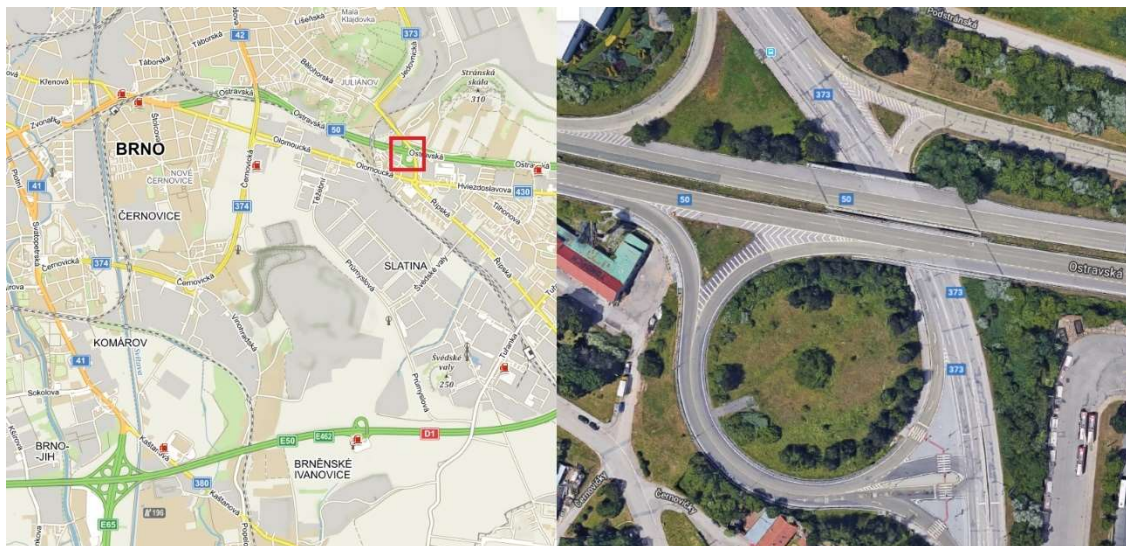


## 8 POROVNÁVACÍ MĚŘENÍ NA MOSTĚ

Druhá fáze experimentu byla realizována na železobetonovém nosníku silničního mostu (obr. 83) nacházejícího se v městské části Brno-Slatina (obr. 84). Most leží na křížení ulice Ostravská s ulicí Bělohorskou. Ulice vedoucí po mostě je zároveň silnicí I. třídy číslo 50, po které směřuje velká část dopravy z centra města směrem na východ na dálnici D1 (a naopak). Komunikace na mostě je směrově rozdělená. Jeho konstrukce je prakticky tvořena dvěma samostatnými mosty s označením 50-003..1 a 50-003..2.



**Obr. 83:** Zkoumaný most 50-003..2 v městské části Brno-Slatina



**Obr. 84:** Mapa s vyznačenou polohou mostu (vlevo) a letecký snímek mostu (vpravo)

Most byl navržen jako integrovaná konstrukce – krajní opěry jsou nahrazeny koncovými příčnicíky podepřenými šikmými stojkami. Nosnou konstrukci tvoří komorové nosníky. Most byl postaven v roce 1980, v roce 2004 proběhla jeho rekonstrukce. V současné době jsou na mostě opět patrné poruchy, z nosníků odpadávají kusy betonové krycí vrstvy. Přitom se přímo pod mostem nachází frekventovaná čtyř-pruhová

komunikace a chodník pro chodce. Případný pád kusu betonu by tedy mohl způsobit nejen materiální škodu na vozidle ale i zranění chodce. Poškozené betonové nosníky byly v době měření provizorně sanovány a pod krajní nosník byla upevněna síť.

Na obr. 83 jsou čísla 1 a 2 označeny opěry mostu pro jejich pozdější rozlišení, měření bylo realizováno na koncích krajního nosníku mostu u obou těchto opěr (obr. 85 a 86). Kraje nosníku byly zvoleny i z toho důvodu, že zde bylo možné stát přímo na svahu pod mostem a provádět měření bez nutnosti použití vysokozdvižné plošiny. To usnadnilo především georadarové a UZ měření. Na vybrané části nosníku byly před měřením narýsovány mřížky, jednotlivé linie byly od sebe vzdáleny 5 cm v horizontálním i ve vertikálním směru. Tyto mřížky byly využity při měření s georadarem GSSI a při UZ pulse-echo metodě. Pro IR termografii však tato příprava před měřením význam neměla. Místo toho byla do rohů měřeného obrazce nalepena hliníková fólie, kterou lze na termogramu snadno odlišit od betonového povrchu, což umožnilo snadnější porovnání jednotlivých měření. Tvrdoměrná metoda a UZ metoda průchodová nebyly při měření na mostě použity.



**Obr. 85:** Opěra mostu č. 1



**Obr. 86:** Opěra mostu č. 2



**Obr. 87:** Měřená plocha na opěře č. 1



**Obr. 88:** Měřená plocha na opěře č. 2

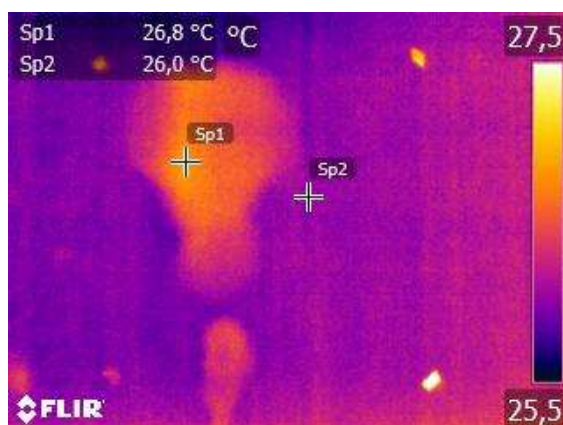


## 8.1 TERMOKAMERA

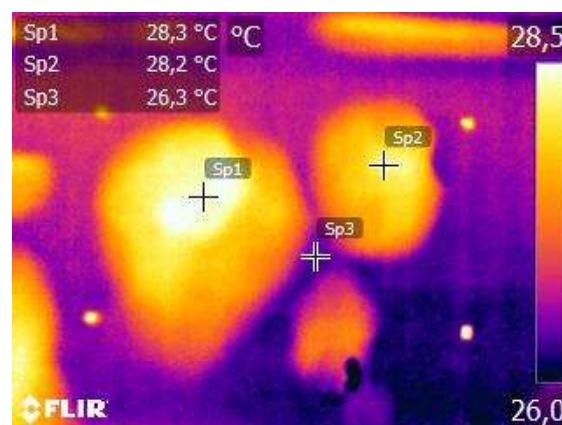
Při měření prováděném na betonovém bloku se ukázalo, že ideální doba pro použití termokamery je mezi 12. a 13. hodinou. Proto bylo v podobném čase provedeno i měření na mostě. Měření bylo realizováno s ruční termokamerou FLIR E60bx, která je jinak určena především pro inspekce budov. Termokamera posloužila v úvodu průzkumu betonového mostu k vytipování vhodných míst (s delaminací) pro provedení srovnávacího měření. Zkoumaná strana nosníku je orientována na severním směrem, takže se po celou dobu měření nacházela ve stínu.

Na termogramech (obr. 89 a 90) je díky teplotnímu kontrastu dobře patrný rozsah delaminace na nosníku mostu. Kousky hliníkové fólie nalepené v rozích mřížky lze pozorovat jako body o zdánlivě vyšší teplotě. V případě nosníku nad opěrou č. 1 byl naměřen teplotní kontrast pouze 0,8 °C. Most byl v tomto místě chráněn okolní vegetací, která omezovala proudění vzduchu a tím pádem i oteplování povrchu mostní konstrukce vlivem změny okolní teploty. Naopak prostor kolem nosníku nad opěrou č. 2 byl více otevřený a povrch nosníku se i v místech s delaminacemi rychleji otepleval. Teplotní kontrast se v době měření pohyboval kolem 2 °C. Také podle pozdějšího průzkumu se ukázalo, že dutina má v tomto místě větší tloušťku než dutina nad opěrou č. 1.

V příloze C.1 jsou uvedeny další termogramy ze zkoumaného mostu.



**Obr. 89:** Termogram betonového nosníku na opěrou č. 1



**Obr. 90:** Termogram betonového nosníku nad opěrou č. 2

## 8.2 GEORADAR

První georadarové měření bylo na mostě provedeno v roce 2018. Nejprve byla použita pouze 2,6 GHz anténa GSSI, u které se předpokládalo lepší vertikální rozlišení než v případě 1,6 GHz antény téže značky. Poté co byl v CDV v roce 2019 pořízen i georadar Proceq, došlo ke změření mostu i tímto přístrojem. Vzhledem k tomu, že měl georadar Hilti snahu vyhodnocovat všechny defekty jako výztuž, nebyla snaha si tento přístroj půjčovat k dalšímu měření.

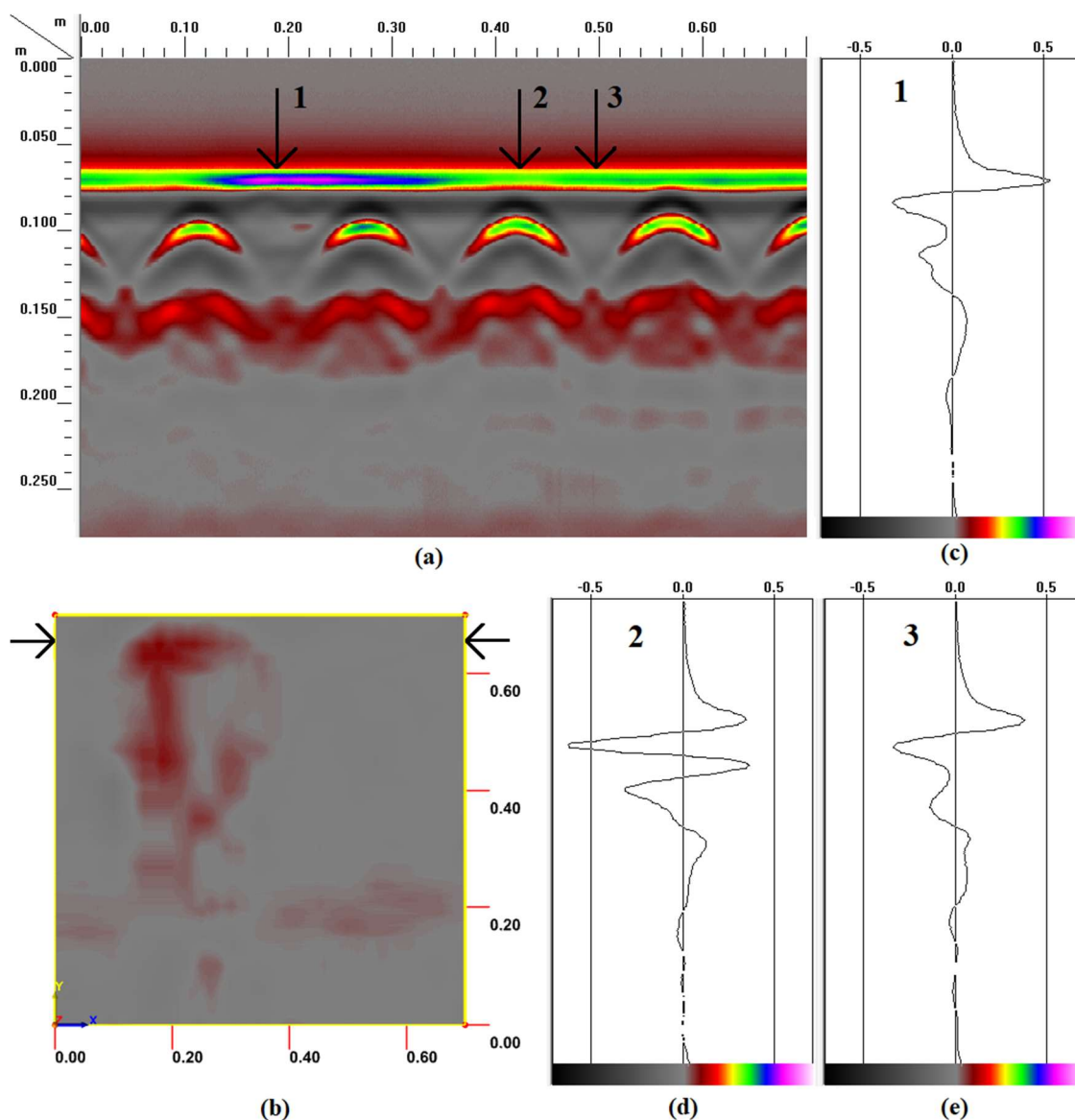
### 8.2.1 Georadar GSSI

Mřížka nakreslená na nosníku nad opěrou č. 1 měla rozměry  $70 \times 70$  cm, u opěry č. 2 bylo měření provedeno na ploše  $90 \times 50$  cm. Měření nosníku s georadarem GSSI bylo poněkud komplikované kvůli složitosti celého zařízení. Pod most bylo potřeba donést řídicí jednotku georadaru, notebook a baterii. Všechno to navíc muselo být uloženo na šikmé ploše svahu pod mostem kvůli omezené délce kabelu od georadarové antény.

Měření probíhalo při stejném nastavení antény jako v případě měření na betonovém bloku. Po změření všech linií ve směru x a ve směru y byla data opět zpracována v programu RADAN 7. Pro každou měřenou oblast byl vytvořen jeden 3D soubor. Při vyhodnocení se však ukázalo, že dutiny jsou příliš blízko povrchu a signál odražený od delaminace částečně splývá se signálem odraženým od betonového povrchu nosníku.



*Obr. 91: Měření nosníku pomocí georadaru GSSI*



**Obr. 92:** Radarogramy z nosníku nad opěrou č. 1

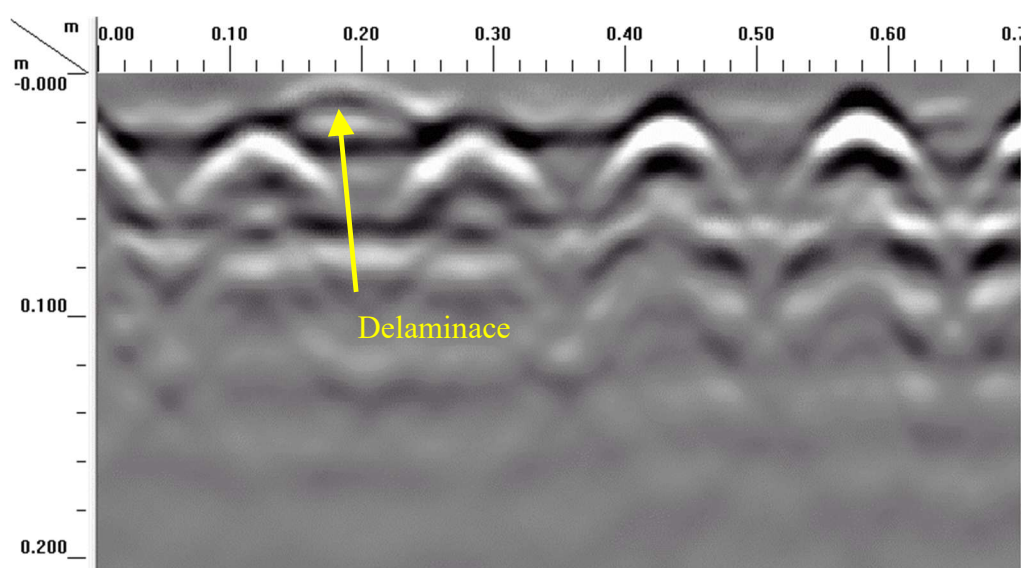
Delaminaci se podařilo identifikovat již na neupravených radarogramech díky výrazně vyšší kladné amplitudě odraženého signálu v místě poruchy. V liniovém skenu (obr. 92a) odpovídá této vyšší amplitudě fialová barva. Rozsah delaminace lze pozorovat na obrázku 92b, kde je zobrazen plošný sken měřené části nosníku nad opěrou č.1. Na krajích plošného skenu je šipkami naznačeno, kudy vede liniový sken. Na něm jsou pak vyznačeny polohy jednotlivých bodových skenů. Srovnáním křivek bodových skenů lze pozorovat rozdíl mezi odraženým signálem z místa delaminace (obr. 92c) a mimo ni. (obr. 92e). Vyšší amplituda v místě delaminace ve skutečnosti představuje součet dvou menších amplitud, z nichž jedna je odraz od povrchu a druhá právě od delaminace. Kvůli nedostatečnému vertikálnímu rozlišení antény tyto dvě amplitudy splývají v jednu.

Po odstranění šumu a zarovnání měřeného povrchu v hloubce 0 cm bylo možné na některých liniových skenech rozeznat náznaky delaminace (obr. 93). Kovová výztuž se

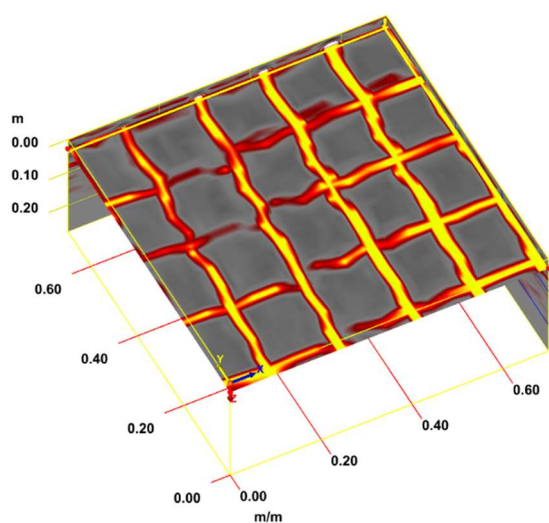


v neupraveném radarogramu běžně zobrazuje v podobě hyperbol, pokud je měření na povrchu prováděno přibližně kolmo na ni. Ve skutečnosti se výztuž, respektive její horní povrch, nachází přesně ve vrcholu hyperboly.

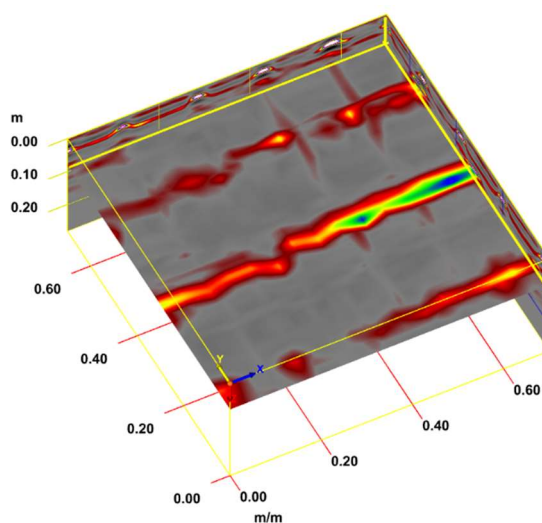
Po vyhodnocení delaminací byly radarogramy dále zpracovány pomocí funkce migrace, došlo tak k převedení původních difrakčních hyperbol na skutečné prutové prvky. Výsledkem bylo poměrně zdařilé určení polohy výztuže (obr. 94) a kabelových kanálků (obr. 95). Na obr. 94 lze v místě delaminace pozorovat odlišný barevný odstín či dokonce mizející výztuž. Tento útlum odraženého signálu je pravděpodobně způsoben rušivým vlivem delaminace a zároveň koroze výztuže.



**Obr. 93:** Liniový sken ve směru osy  $x$ , nosník nad opěrou č. 1

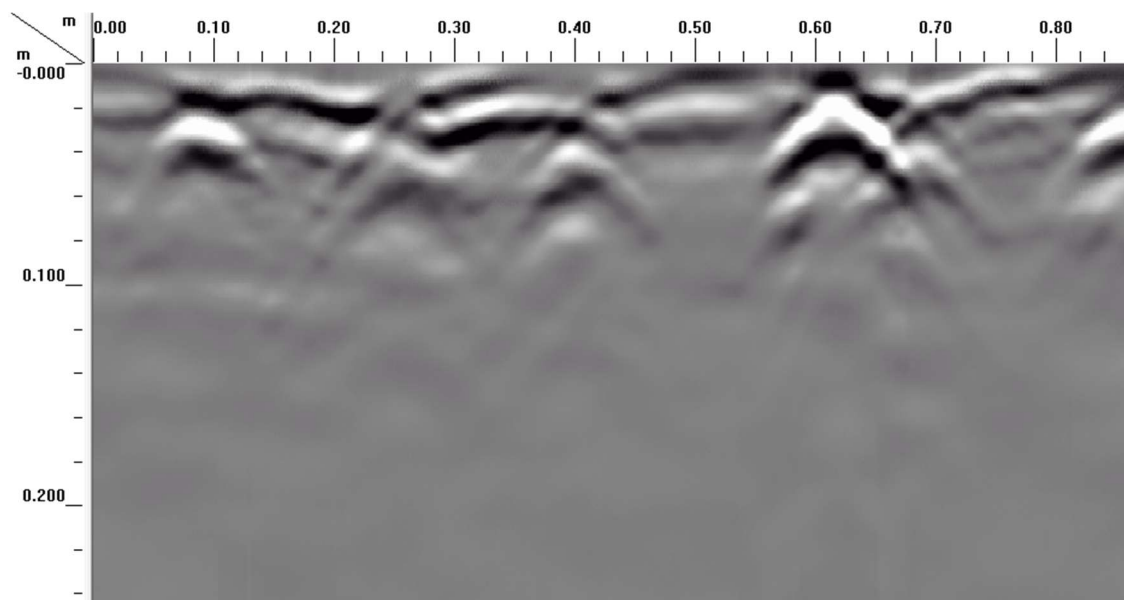


**Obr. 94:** 3-D sken výztuže nosníku nad opěrou č. 1

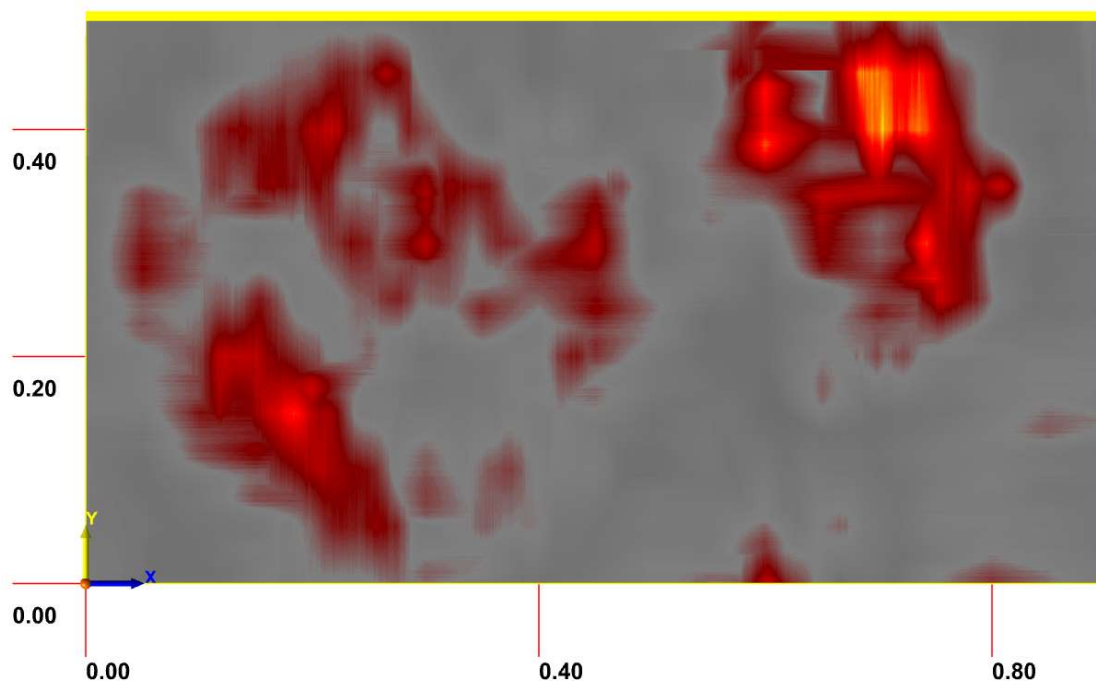


**Obr. 95:** 3-D sken kabelových kanálků nad opěrou č. 1

Delaminace na nosníku nad opěrou č. 2 byla výraznější než nad opěrou č. 1. Dutina pod delaminovaným povrchem měla také větší tloušťku. Navíc koroze výztuže, zejména pak třmínků dosahovala i vyššího stupně. Korozní produkty spolu s delaminací způsobovaly rušení signálu, takže některé hyperboly na radarogramu (obr. 96) ani nemají svůj obvyklý tvar. Rozsah delaminace na plošném skenu (obr. 97) přibližně odpovídá výsledku měření s termokamerou.



**Obr. 96:** Liniový sken nosníku ve směru osy  $x$  nad opěrou č. 2



**Obr. 97:** Plošný sken nosníku nad opěrou č. 2

### 8.2.2 Georadar Proceq GP8000

Měření s georadarem Proceq bylo provedeno v srpnu roku 2019. Na každé opěře byla použita standartní papírová šablona o rozměru  $60 \times 60$  cm s rastrem 5 cm (obr. 98). Při měření byla šablona uchycena na nosník tak, aby se levý horní roh mřížky šablony překrýval s levým horním rohem mřížek narýsovaných na nosníku. Měření bylo prováděno s nastavením 2 skeny/cm, tedy s nejvyšším možným. Dále byl zvolen režim maximálního hloubkového dosahu na úkor nižší rychlosti měření.

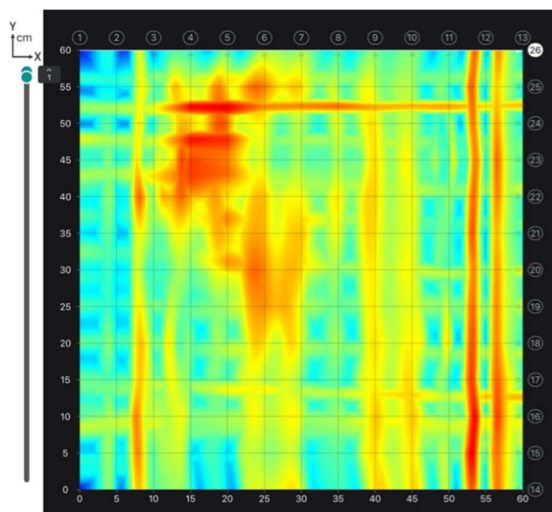
Prokázání delaminace na nosníku u opěry č. 1 nebylo z dat naměřených georadarem Proceq zcela přesvědčivé. Určitý náznak poruchy lze pozorovat na plošném skenu z hloubky 0-1 cm (obr. 99). Na obrázku je patrná delaminace, která se přibližně shoduje s výsledky z termokamery a z georadaru GSSI. Čáry na obrázku jsou pouze důsledkem příliš vysokého zisku, nastaveného při exportu plošného skenu. Liniový sken (obr. 101 a 102) je v hloubce 0 cm zarovnan s povrchem konstrukce a není na něm patrná žádná delaminace ani zvýšená amplituda v místě rozhraní beton-vzduch.

Výztuž a kanálky předpínací výztuže se ve srovnání s delaminacemi podařilo lokalizovat mnohem lépe. Na obr. 103 je plošný sken výztuže betonového nosníku nad opěrou č. 1, zobrazovaná hloubka je 1-4 cm. Protože delaminace nad výztuží ovlivňuje intenzitu odraženého signálu, jsou především třmínky díky tomu vykresleny s jiným barevným odstínem. Plošný sken na obr. 104 z hloubky 9-17 cm zachycuje kanálky předpínací výztuže. Horní kanálek je hůře rozeznatelný, protože se nachází přesně pod podélnou výztuží, která způsobuje částečné rušení signálu.

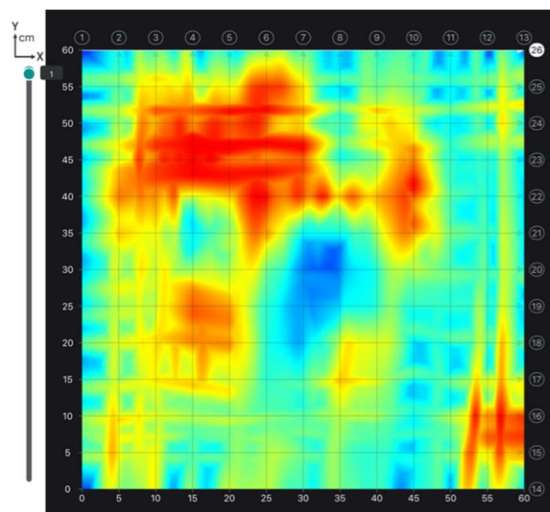


**Obr. 98:** Měření ŽB nosníku mostu georadarem Proceq, vlevo: kontrola naměřených dat in situ

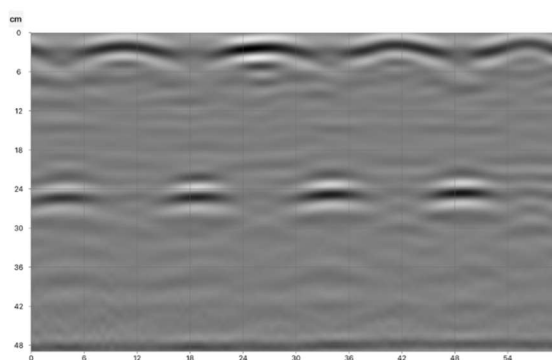




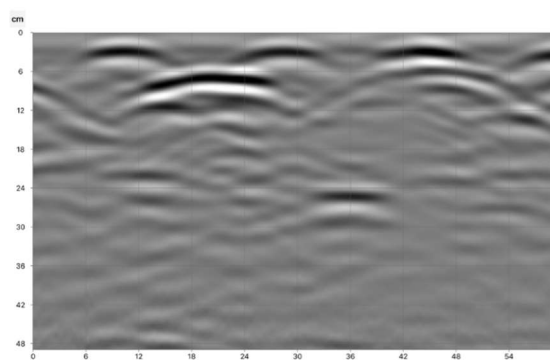
**Obr. 99:** Plošný sken nosníku nad opěrou č. 1 v hloubce 0-1 cm



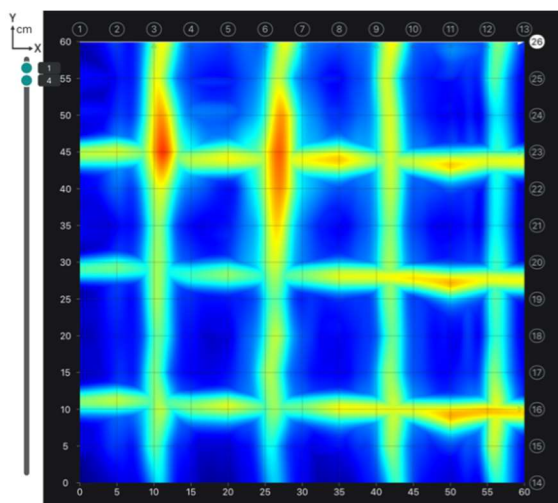
**Obr. 100:** Plošný sken nosníku nad opěrou č. 2 v hloubce 0-1 cm



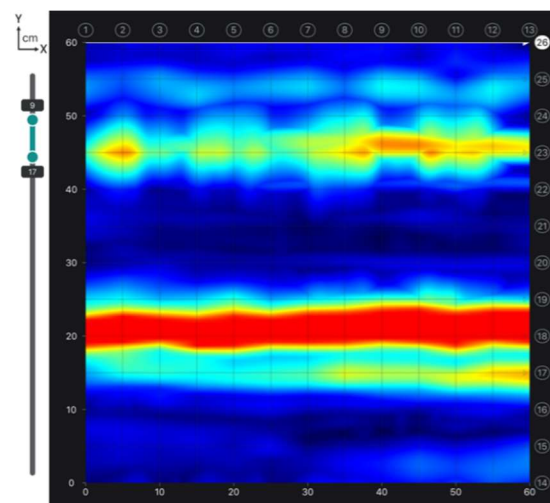
**Obr. 101:** Liniový sken nosníku ve směru osy x nad opěrou č. 1



**Obr. 102:** Liniový sken nosníku ve směru osy y nad opěrou č. 1



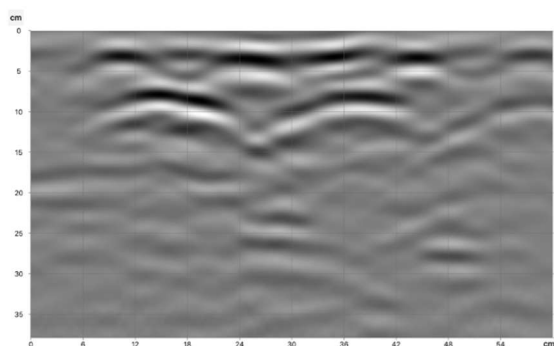
**Obr. 103:** Plošný sken výztuže nosníku nad opěrou č. 1



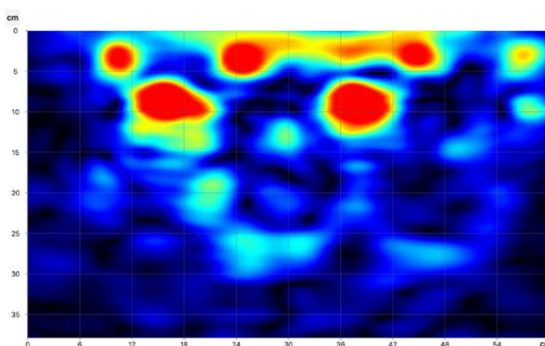
**Obr. 104:** Plošný sken kabelových kanálků nosníku nad opěrou č. 1

Nosník nad opěrou č. 2 byl změřen podobným způsobem jako na protější straně. Plošný sken z hloubky 0-1 cm (obr. 100) opět částečně zachycuje delaminaci, tentokrát je záznam o trochu zřetelnější díky většímu rozsahu delaminace. Na této straně nosníku se podařilo zachytit delaminaci i na liniových skenech. Na obrázku 105 je patrná v úrovni výztuže mezi dvěma hyperbolami. Další dvě spodní hyperboly představují kabelové kanálky, osa y je na ně kolmá. Odpovídající liniový sken po automatické úpravě je zobrazen na obr. 106, zde jsou již hyperboly nahrazeny kruhovými prvky. Delaminace má podobu červenožluté anomálie.

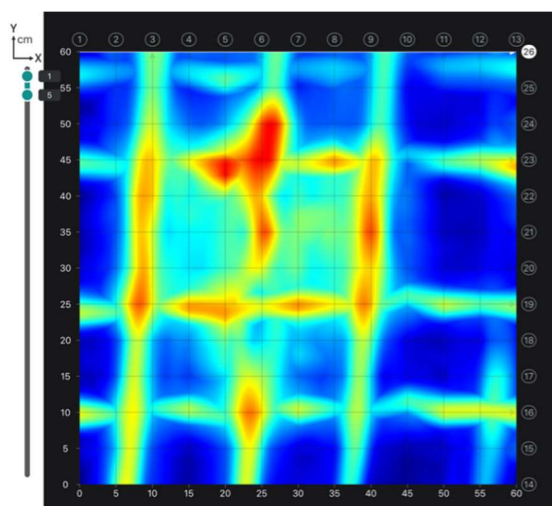
Na obr. 107 je plošný sken výztuže betonového nosníku nad opěrou č. 2, zobrazovaná hloubka je 1-5 cm. Značnému koroznímu poškození výztuže odpovídá i ne zcela ostrý radarogram. Kabelové kanálky se podařilo zachytit na plošném skenu z hloubky 9-17 cm (obr. 108).



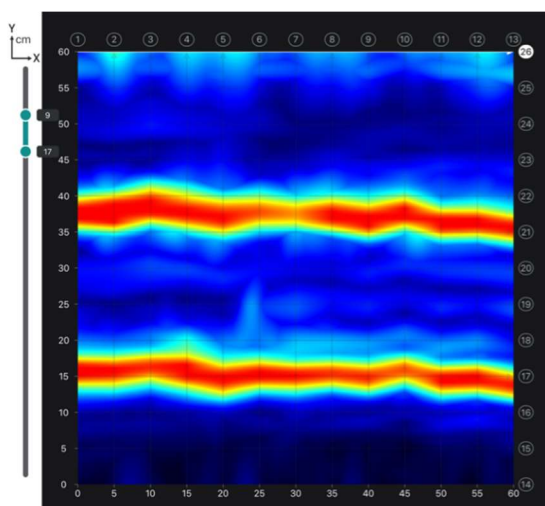
**Obr. 105:** Liniový sken ve směru osy y nad opěrou č. 2



**Obr. 106:** Liniový sken ve směru osy y nad opěrou č. 2 - po automatické úpravě



**Obr. 107:** Plošný sken výztuže nosníku nad opěrou č. 2

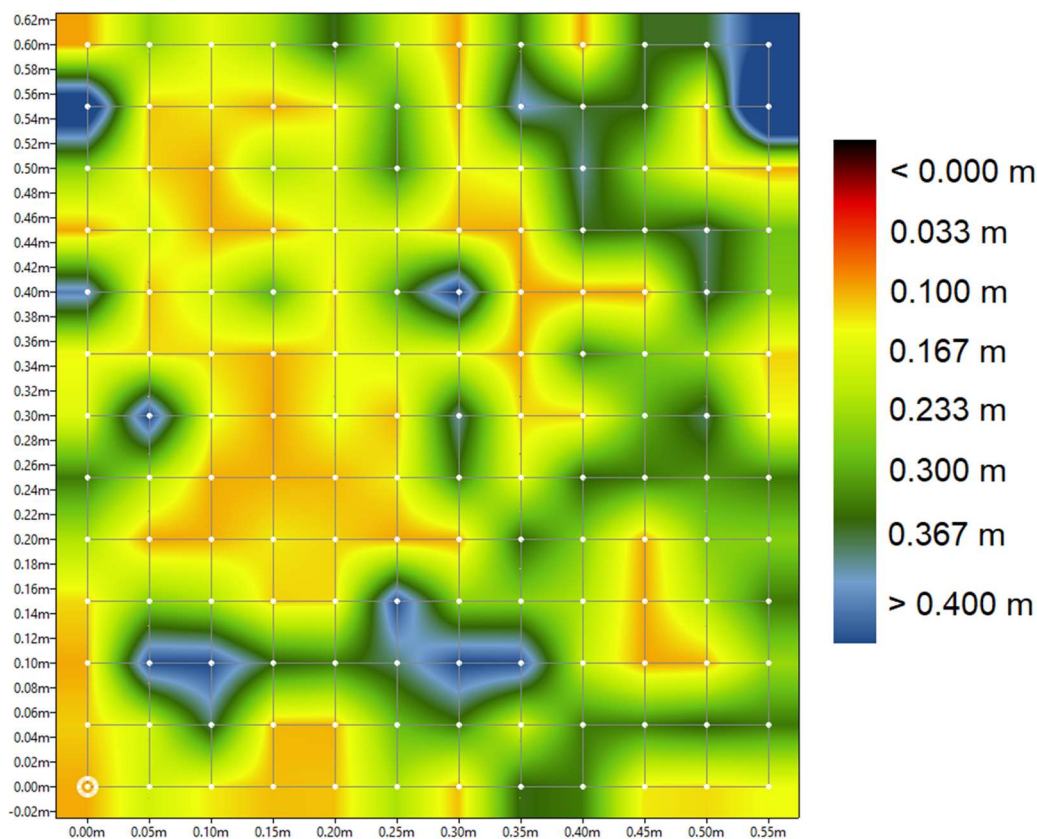


**Obr. 108:** Plošný sken kabelových kanálků nosníku nad opěrou č. 1

### 8.3 METODA PULSE-ECHO

Ultrazvukový průzkum betonového nosníku byl opět proveden pomocí přístroje Pundit PL-200PE. Při měření byly využity mřížky nakreslené na obou koncích nosníku. Jednotlivé bodové skeny UZ přístroj skládal, stejně jako v případě měření na betonovém bloku, do jednoho plošného skenu. I zde se bohužel potvrdilo, že přístroj má potíže s detekcí objektů/dutin, které se nachází blízko povrchu. Vrstva delaminovaného betonu byla příliš tenká, než aby UZ pulse-echo přístroj s danou frekvencí sond dokázal změřit jeho tloušťku. Získaný plošný sken z měření nad opěrou č. 1 (obr. 109) se nakonec vůbec nepodobá výsledkům z georadarů či termokamery.

V konečném výsledku se tedy pomocí UZ pulse-echo metody nepodařilo delaminace na betonovém nosníku mostu lokalizovat. Běžně používané odrazové sondy s frekvencí přibližně 50 kHz, umožňují detekovat tloušťku betonu do cca 1,0 m. Využití sond s vyšší frekvencí (např. 150-250 kHz) by mohlo přinést zpřesnění měření a umožnit lepší detekci vad blízko pod povrchem. Na druhou stranu by však došlo k výraznému snížení dosahu, odhadem na méně než 0,2 m. Ultrazvuková metoda bude vždy určena pro detekci spíše větších poruch ve větší hloubce.



**Obr. 109:** Plošný sken nosníku mostu nad opěrou č. 1

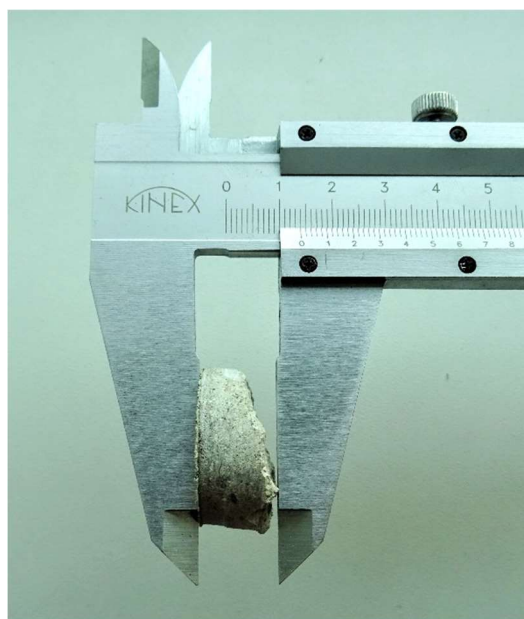


## 8.4 DESTRUKTIVNÍ OVĚŘENÍ

Po realizaci všech NDT metod byly z obou měřených ploch odebrány jádrové mikro-vývrty o průměru 30 mm a nad opěrou č. 2 byla provedena také sonda. Odběr byl proveden ručním aku vrtacím kladivem a sonda pomocí majzlíku a kladiva. Mimo jiné se prokázalo, že se v těchto místech opravdu nachází dutina. Mikro-vývrt byl z nosníku nad opěrou č. 1 odebrán v bodě mřížky o souřadnicích [20,50] cm (souřadnici [0,0] uvažujeme v levém dolním rohu mřížky). Místo odběru mikro-vývrty také přibližně odpovídalo bodu Sp1 na obr. 89. Šířka delaminace v tomto místě činila cca 3 mm (obr. 110). Tloušťka samotného vývrty byla dosti nepravidelná a pohybovala se v rozmezí 7 až 14 mm (obr. 111).



**Obr. 110:** Detail otvoru po jádrovém mikro-vývrty, nosník nad opěrou č. 1



**Obr. 111:** Měření tloušťky jádrového mikro-vývrty, nosník nad opěrou č. 1

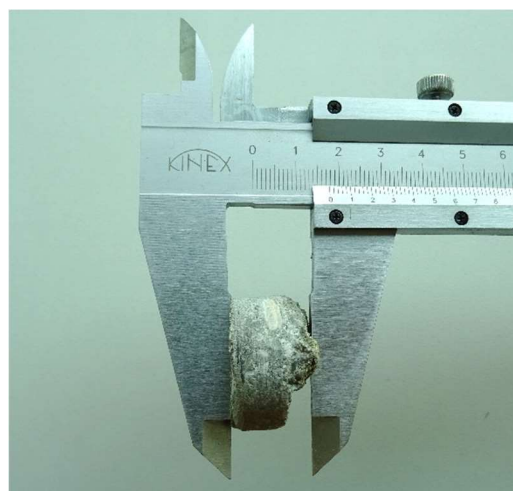
Mikro-vývrt byl z nosníku nad opěrou č. 2 odebrán v bodě mřížky o souřadnicích [25, 30] cm (souřadnici [0,0] opět uvažujeme v levém dolním rohu mřížky). Tomuto místu odpovídá bod Sp1 z termogramu na obr. 90, sonda byla provedena nad bodem Sp2 ze stejného obrázku. Dutina pod zkoumaným povrchem nosníku měla v místě sondy šířku až 8 mm a tloušťka vývrty se pohybovala mezi 10 až 16 mm (obr. 114). Díky sondě (obr. 115 a 116) i vývrty (obr. 113) byla potvrzena silná koroze výztuže pod betonovým povrchem.



**Obr. 112:** Rozložení jádrového mikro-vývrtu a sondy na nosníku nad opěrou č. 2



**Obr. 113:** Detail otvoru po jádrovém mikro-vývrtu, nosník nad opěrou č. 2



**Obr. 114:** Měření tloušťky jádrového mikro-vývrtu, nosník nad opěrou č. 2



**Obr. 115:** Sonda v nosníku nad opěrou č. 2

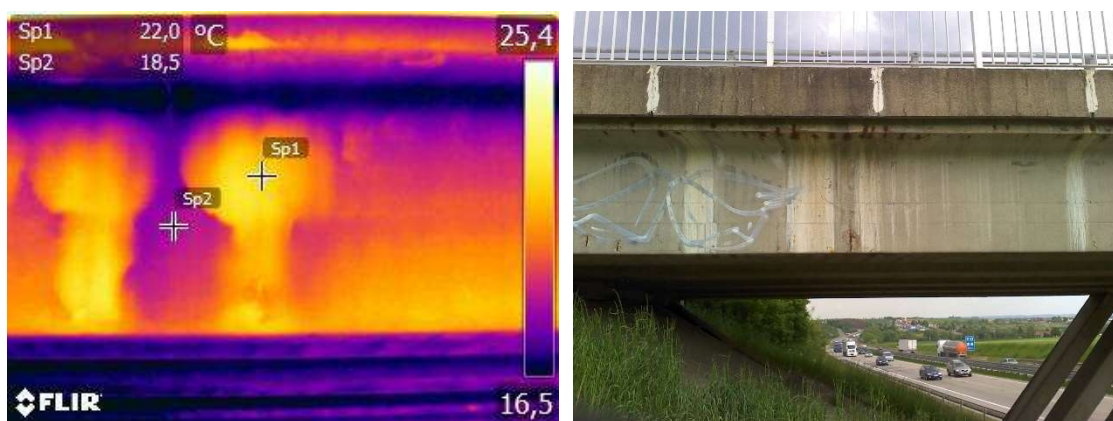


**Obr. 116:** Detail zkorodované výztuže v provedené sondě

## 9 TERMOGRAFICKÉ ZKOUŠENÍ V PRAXI

### 9.1 DOBA MĚŘENÍ

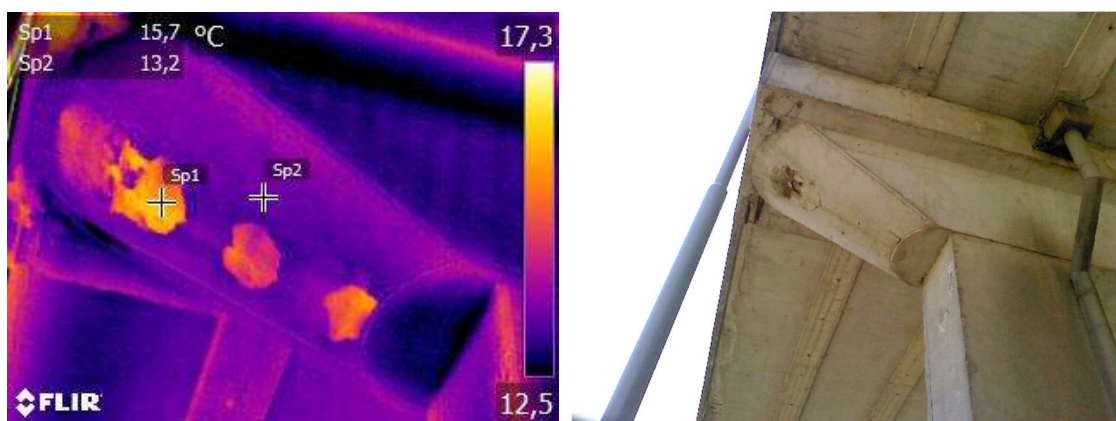
Termografické zkoušení je možné za vhodných podmínek provádět na betonových, železobetonových a předpjatých konstrukcích. Měřit povrchy vystavené slunečnímu záření (obr. 117) se doporučuje ve dnech s nepřerušovaným slunečním svitem a minimální oblačností. Zkoušení by se mělo provádět alespoň 4 hodiny po východu slunce, z důvodu vytvoření dostatečného teplotního kontrastu. V závislosti na orientaci zkoumaného povrchu konstrukce a délce slunečního svitu trvá využitelná doba pro měření až cca 6 hodin. Obecně platí, že vítr snižuje vliv slunečních paprsků na zahřívání povrchu a zmenšuje tak teplotní kontrast v místech s podpovrchovými poruchami. Žádný nebo mírný vítr nebude mít rušivý efekt na případné vytvoření teplotního kontrastu na povrchu konstrukce vystavené slunečnímu záření. Naopak není vhodné provádět měření, pokud se podle předpovědi počasí očekává vysoká průměrná rychlost větru před a během měření.



**Obr. 117:** Předpjatý nosník mostu s delaminovaným povrchem, ev. č. mostu 3833-1 přes dálnici D1 v km 205,8

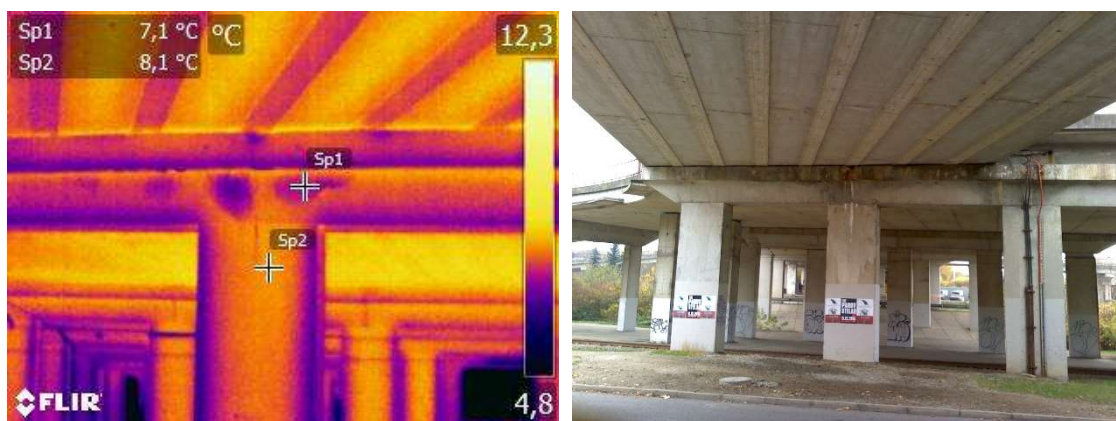
Termografické zkoušení povrchů nacházejících se ve stínu (obr. 118) se doporučuje provádět ve dnech, ve kterých se očekává nárůst okolní teploty vzduchu alespoň o 10 °C. Obecně platí, že rychlejší nárůst okolní teploty má za následek výraznější teplotní kontrast. Ve chvíli, kdy se zastaví růst okolní teploty a nastane její pokles, lze očekávat i snižování teplotního kontrastu až do úplného vymizení. Geometrie mostu spolu s okolním terénem a vegetací mohou mít za následek, že se teplota vzduchu v blízkosti mostu bude měnit jen velmi pomalu, což znemožní vznik teplotního kontrastu na jeho povrchu. V těchto situacích může být prospěšný vítr, který umožní rychlejší příliv teplejšího/chladnějšího vzduchu ke konstrukci mostu, a tedy vznik teplotního kontrastu. Vysoké průměrné rychlosti větru proto nemusí mít nutně negativní vliv na vývoj teplotního kontrastu při měření stíněných povrchů. Termografické zkoušení lze začít provádět nejdříve 4 až 5 hodin po východu slunce, z důvodu vytvoření dostatečného teplotního kontrastu. Při zachování vhodných podmínek, lze měřit po dobu až 8 hodin, ovšem v závislosti na roční době.





**Obr. 118:** Delaminace na spodní části úložného prahu opěry, ev. č. mostu 42-011.2

Měření lze teoreticky provádět i v nočních hodinách, delaminaci však v tomto případě označuje negativní teplotní kontrast. S měřením je vhodné začít až po západu slunce. Z hlediska provádění je ovšem praktičtější měření za denního světla. Pokud se teplota vzduchu uplynulou noc pohybovala alespoň o 10 °C níže než předchozí den, lze při dostatečném teplotním kontrastu provádět měření i v ranních hodinách (obr. 119). Toto měření je možno provádět do doby, než začne teplota vzduchu i konstrukce opět růst, tedy přibližně 1 hodinu po východu slunce. Klasickým příkladem je teplý den následovaný bezoblačnou nocí, během níž většinou teploty klesají na nižší teploty.



**Obr. 119:** Delaminace povrchu úložného prahu opěry, ev. č. mostu 42-011..2

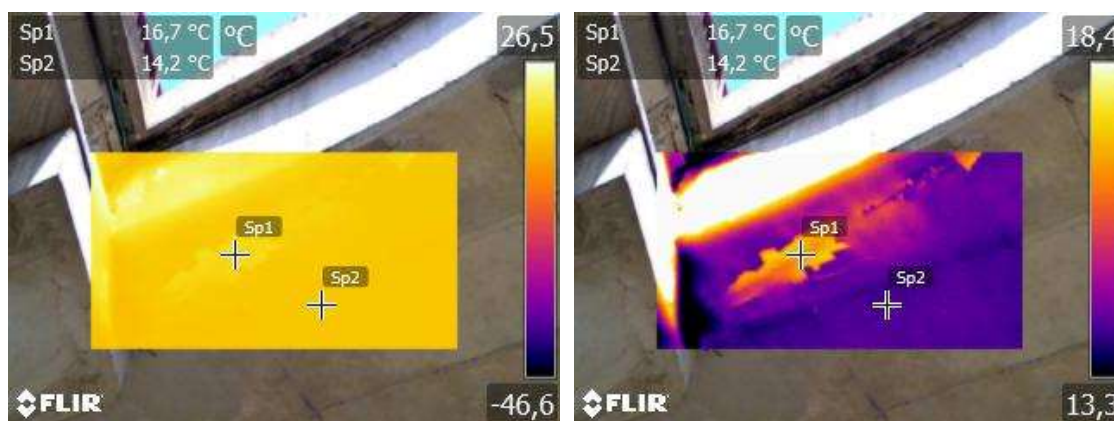
Nedoporučuje se provádět měření ve dnech, kdy se denní teploty příliš neliší od nočních a zároveň na zkoumaný povrch konstrukce nedopadá sluneční záření. Typickým příkladem je sychravé podzimní počasí. V těchto situacích téměř nevzniká teplotní kontrast a poruchy tedy nemusí být zjistitelné.

Dále není vhodné provádět měření v době, kdy přechází pozitivní teplotní kontrast v negativní a naopak. V těchto okamžicích se teplota povrchu nad poruchou rovná teplotě okolního neporušeného betonu, a proto nelze závady pomocí termokamery odhalit. Tato situace nastává zpravidla v ranních a podvečerních hodinách.

## 9.2 NASTAVENÍ TERMOKAMERY

V prvé řadě je potřeba mít při měření vždy správně zaostřený objektiv termokamery na povrch konstrukce, jen tak lze odhalit poruchy i při nízkém teplotním kontrastu. Při ostření si lze vypomoci například umístěním pravidelně tvarovaného předmětu na měřený povrch. Velkou výhodou je automatické ostření, které bylo dříve běžné jen u nejdražších modelů, v poslední době se však již objevuje i u nižších řad termokamer.

Termokamera v automatickém režimu obvykle sama upravuje zobrazení barev na svém displeji podle rozpětí teplot snímaných objektů nacházejících se v aktuálním zorném poli. Automatický režim ovšem nemusí být vždy nejvhodnější. Pokud například do záběru zasahuje obloha (obr. 120) nebo jiné objekty s hodně odlišnou teplotou, termokamera se obvykle v automatickém režimu tomuto teplotnímu rozsahu přizpůsobí a malé teplotní odchylky mohou zaniknout. Pro měření na stíněných površích, kde se rozdíl teplot u delaminací zpravidla pohybuje kolem 1 až 2 °C, je výhodné v termokameře nastavit úzké rozpětí teplot (v závislosti na měřeném povrchu) maximálně do 5 °C.



**Obr. 120:** Dva stejné termogramy s odlišně nastaveným teplotním rozsahem, vlevo: automatický, vpravo: manuální, ev. č. mostu 42-011.2

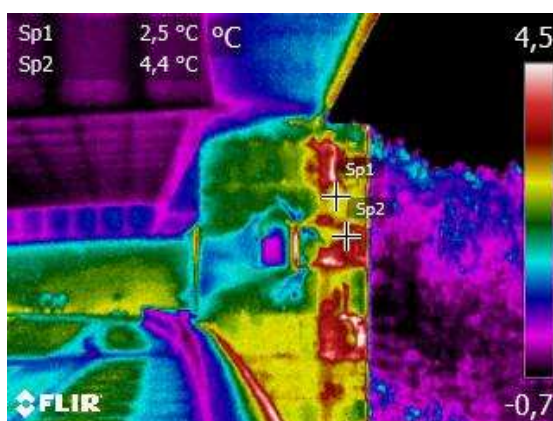
Měření je vhodné provádět kolmo na povrch konstrukce, případně co nejbližší tomuto směru. Při snímání povrchu pod nízkým úhlem může dojít k nežádoucímu zaznamenání odrazů od okolních objektů.

Výběr objektivu se odvíjí od vzdálenosti, ze které je prováděno měření. Nejběžněji používané termokamery mají objektivy se zorným polem okolo 25°, ty jsou vhodné pro pozorování ze vzdálenosti přibližně 10 až 20 m. Pro kratší vzdálenosti je doporučeno použít širokoúhlý objektiv (45°), pro delší naopak teleobjektiv.

### 9.3 ZPRACOVÁNÍ TERMOGRAMŮ

Každý výrobce termokamer zpravidla dodává ke svým výrobkům alespoň základní software pro prohlížení a zpracování termogramů. Někteří výrobci dále nabízejí za příplatek i pokročilejší verze softwaru s více funkcemi. Mezi základní funkce softwaru patří volba různých barevných palet (obr. 121-123), nastavení teplotního rozsahu, přidávání bodových měření, vyhodnocení minim a maxim apod.

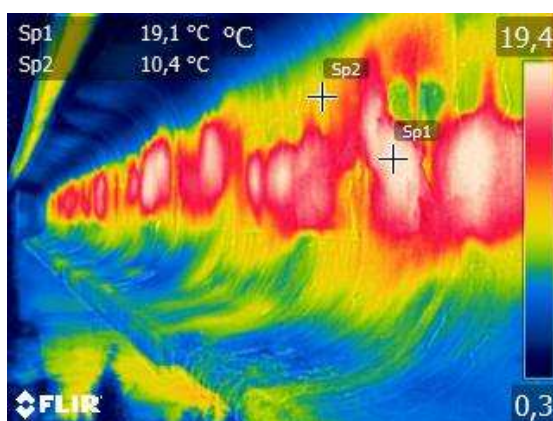
Při vyhodnocování termogramů lze přidávat i různé měřicí funkce. Jeden příklad je uveden na obrázku 124, na kterém je termogram zkoumaného nosníku nad opěrou č. 2. Delaminovaná oblast zde byla označena elipsou, software v ní automaticky vyhledal nejteplejší a nejchladnější bod, vypočítal průměr teplot a určil obsah plochy. K určení obsahu je nicméně potřeba znát přesnou vzdálenost od měřeného objektu, což ovšem není u novějších termokamer problém, protože obsahují laserový dálkoměr, který mimo jiné pomáhá i při ostření.



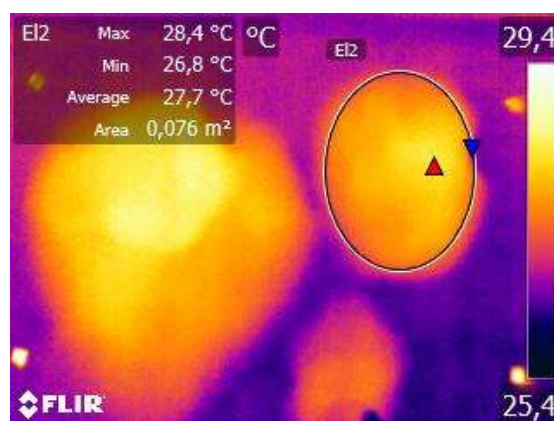
**Obr. 121:** Delaminace na povrchu pilíře, ev. č. mostu D1-075.1



**Obr. 122:** Delaminace na povrchu úložného prahu, ev. č. mostu 42-011.2



**Obr. 123:** Delaminace na povrchu nosníku, ev. č. mostu 50-007



**Obr. 124:** Určení obsahu delaminované plochy

## 10 ZÁVĚR A SHRNUTÍ

Při měření na betonovém bloku se ukázala rozdílná použitelnost jednotlivých metod. Každá z nich má určité přednosti i negativa. Jako nejméně účinná se jeví metoda tvrdoměrná, ačkoliv při měření pomocí tvrdoměru Silver Schmidt byly alespoň některé poruchy nacházející se v těsné blízkosti povrchu lokalizovány. Ultrazvuková průchodová metoda dokázala odhalit pouze větší defekty, navíc bylo měření dosti zdlouhavé a vyžadovalo přístup z obou stran zkoumaného objektu, což není v terénu vždy možné. Následující měření betonového mostu bylo tedy realizováno bez těchto dvou metod.

Při měření na mostě se projevila omezená schopnost georadaru odhalit dutiny nacházející se těsně pod povrchem. Bohužel ultrazvuková pulse-echo metoda nedokázala tyto poruchy odhalit vůbec, pokud se nacházely do hloubky přibližně 5 cm. Naopak termografická metoda byla při lokalizaci dutin nacházejících se blízko pod povrchem velice úspěšná, ovšem pouze za příznivých klimatických podmínek. K lokalizaci dutin nacházejících se ve větší hloubce je vhodnější georadar a ultrazvuk. Pulse-echo metoda má navíc ve srovnání s georadarem výhodu při zkoumání dutin ve větších hloubkách v železobetonových prvcích nebo při kontrole zainjektování kabelových kanálků, protože je na rozdíl od georadaru méně rušena kovovými prvky.

Ze zkoumaných metod lze jednoznačně provést nejrychleji měření pomocí termokamery. Následuje georadar, kvůli možnosti provádět liniové měření. Nejpomalejší je metoda pulse-echo, která umožňuje pouze bodové měření. Některé georadarové a ultrazvukové přístroje jsou však více uživatelsky přívětivé a z jednotlivých měření automaticky vytváří plošný sken. Co se týče přesnosti v určení tvaru a velikosti poruchy (delaminace), vychází z provedených měření termokamera a georadar podobně. Toto však platí pouze při dostatečné hustotě jednotlivých georadarových skenů a přiměřené vzdálenosti termokamery od měřeného povrchu. Kvalitnější termokamery navíc disponují laserovým dálkoměrem, díky čemuž lze následně stanovit rozměry delaminace. Metoda pulse-echo ve schopnosti určit přesný tvar defektu za dalšími dvěma metodami zaostává.

Pomocí termokamery nelze přímo určit hloubku defektu. Naopak georadar je poměrně přesný, pokud se tedy dutina nenachází příliš blízko pod povrchem a tento rozměr není za hranicí rozlišovací schopnosti antény. Při měření lze použít přibližnou hodnotu relativní permitivity, která se v případě běžných betonů moc neliší. Pro přesnější měření je potřeba provést kalibraci na prvku o známé tloušťce a stanovit tak přesnou hodnotu relativní permitivity, respektive rychlosti šíření EM signálu ve zkoumaném materiálu. Metoda pulse-echo byla v určení vzdálenosti defektu od povrchu přesná až od určité hloubky. Mělké defekty se touto metodou nepodařilo lokalizovat vůbec nebo byl výsledek nadhodnocený. Malé objekty bylo v betonovém panelu možné detekovat nejlépe pomocí georadaru, v případě přístroje Hilti však došlo ke zkreslení rozměrů. Termokamera dokázala lokalizovat v betonovém bloku nejmenší defekty nacházející se pouze v nejmenší hloubce. Přístroj Pundit PL200-PE nedokázal nejmenší objekty detekovat vůbec, UZ signál pravděpodobně jen prošel kolem nich.



Při srovnání výsledků použitých georadarů vychází nejlépe přístroj od společnosti GSSI. Tvary objektů se na plošných skenech naměřených tímto přístrojem nejvíce shodují se skutečností. I výsledky hloubek naměřených georadarem GSSI byly nejpřesnější. Příslušný software Radan 7 také nabízí nejvíce možností při analýze naměřených dat. Ostatní dva výrobci testovaných georadarů Proceq a Hilti vsází spíše na jednoduchost svých přístrojů. Měření s nimi je mnohem rychlejší, přístroje jsou jednodušší jak na ovládání, tak i na manipulaci. Hodí se tedy mnohem více do praxe, ačkoliv georadar Hilti je určený pouze na vyhledávání výztuže.

Obě použité termokamery byly značky FLIR. První byla ruční a sloužila především pro terénní měření. Druhá – stacionární musela být při měření upevněna ve stativu a připojena k počítači a k elektrickému zdroji. Kromě rozlišení termogramů byly výsledky srovnatelné, data z obou termokamer se vyhodnocovaly ve stejném programu Flir Tools.

Cenově vychází pořízení kvalitní termokamery podobně jako UZ pulse-echo přístroj. Georadar je ve srovnání s nimi přibližně dvakrát dražší a jeho cena přesahuje 500 tis. Kč.

Vzhledem k povaze poruch a jejich hloubce byla jako nejvhodnější metoda pro diagnostiku zkoumaného mostu vybrána termografická zkušební metoda. Mezi její hlavní přednosti patří rychlost, kterou lze zkontrolovat celý most a dále možnost provádět měření bez přímého přístupu ke konstrukci. Díky tomu lze zkontrolovat i části konstrukce mostu, které se nachází nad rušnou silnicí bez omezení provozu.

Měření na dalších mostech bylo potvrzeno, že charakter delaminací je na ostatních mostech podobný. Příčinou jejich vzniku bývá porucha sanace nebo koroze výztuže s nedostatečným krytím. Tloušťky delaminací se v těchto případech obvykle pohybují do 3 cm, díky čemuž jsou dobře odhalitelné pomocí termokamer. Jedinou nevýhodu tak představuje skutečnost, že měření je potřeba provádět pouze za vhodných klimatických podmínek, které umožňují vznik teplotního kontrastu v místě poruch.

Předností termografické zkušební metody je především rychlost, s jakou lze měření provádět ve srovnání s ostatními metodami. Z pořízených termogramů je možné snadno stanovit rozsah poškození na celé betonové konstrukci. Vzhledem k vysokému počtu mostů v neuspokojivém stavebně-technickém stavu v České republice lze konstatovat, že existuje uplatnění pro využití termografické zkušební metody při jejich diagnostice. Termografické zkoušení je svým charakterem poměrně jednoduché. Dá se proto uvažovat o jeho využití nejen při diagnostickém průzkumu, ale i v rámci prohlídek mostů. Nejen pro správce mostů byla v roce 2018 vytvořena certifikovaná metodika ministerstva dopravy s názvem: „Uplatnění termografie při diagnostice objektů dopravní infrastruktury“ jejíž přípravu měl na starosti autor této disertační práce.



## SEZNAM LITERATURY

- [1] HROMÁDKO, Jan. Vady a poruchy oprav betonových konstrukcí z pohledu objednavatele a majetkového správce. *Beton TKS*. Praha, 2015, **15**(3), 11-20. ISSN 1213-3116.
- [2] GUCUNSKI, Nenad. *Nondestructive testing to identify concrete bridge deck deterioration*. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2013. SHRP 2 report, S2-R06A-RR-1. ISBN 978-0-309-12933-6.
- [3] WHITE, Joshua, Stefan HURLEBAUS a Andrew WIMSATT. Concrete Bridge Deck Condition Assessment using Multi-Method Nondestructive Testing Techniques. In: *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE): September 15-17, 2015, Berlin, Germany*. 2015.
- [4] ABU DABOUS, Saleh, Salam YAGHI, Sabah ALKASS a Osama MOSELHI. Concrete bridge deck condition assessment using IR Thermography and Ground Penetrating Radar technologies. *Automation in Construction*. 2017, **81**, 340-354. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.04.006. ISSN 0926-5805. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926580517303229>
- [5] MASER, Kenneth. Integration of Ground Penetrating Radar and Infrared Thermography for Bridge Deck Condition Evaluation. In: *NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering: June 30th – July 3rd, 2009, Nantes, France*. 2009.
- [6] SHOKOUHI, Parisa, Jens WÖSTMANN, Gerhard SCHNEIDER, Boris MILMANN, Alexander TAFFE a Herbert WIGGENHAUSER. Nondestructive Detection of Delamination in Concrete Slabs. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2011, **2251**(1), 103-113. DOI: 10.3141/2251-11. ISSN 0361-1981. Dostupné také z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.3141/2251-11>
- [7] OH, Taekeun, Seong-Hoon KEE, Ralf W. ARNDT, John S. POPOVICS a Jinying ZHU. Comparison of NDT Methods for Assessment of a Concrete Bridge Deck. In: *Journal of Engineering Mechanics*. 2013, **139**(3), s. 305-314. DOI: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000441. ISSN 0733-9399. Dostupné také z: [http://ascelibrary.org/doi/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0000441](http://ascelibrary.org/doi/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000441)
- [8] YEHIA, Sherif, Osama ABUDAYYEH, Saleh NABULSI a Ikhlas ABDELQADER. Detection of Common Defects in Concrete Bridge Decks Using Nondestructive Evaluation Techniques. *Journal of Bridge Engineering*. 2007, **12**(2), 215-225. DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0702(2007)12:2(215). ISSN 1084-0702. Dostupné také z: [http://ascelibrary.org/doi/10.1061/\(ASCE\)1084-0702\(2007\)12:2\(215\)](http://ascelibrary.org/doi/10.1061/(ASCE)1084-0702(2007)12:2(215))

- [9] CAPOZZOLI, Luigi a Enzo RIZZO. Combined NDT techniques in civil engineering applications: Laboratory and real test. *Construction and Building Materials*. 2017, **154**, 1139-1150. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.147. ISSN 09500618. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061817314903>
- [10] KHAN, Fuad, Matteo MAZZOTTI, Ivan BARTOLI, Jeff WEIDNER, Emin AKTAN a Franklin MOON. Validation and Integration of Non Destructive Evaluation data for the assessment of bridge decks. In: *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE): September 15-17, 2015, Berlin, Germany*. 2015.
- [11] CHENG, Chia-Chi, Tao-Ming CHENG a Chih-Hung CHIANG. Defect detection of concrete structures using both infrared thermography and elastic waves. *Automation in Construction*. 2008, **18**(1), 87-92. DOI: 10.1016/j.autcon.2008.05.004. ISSN 0926-5805. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926580508000812>
- [12] HUSTON, Dryver, Jianhong CUI, Dylan BURNS a David HURLEY. Concrete bridge deck condition assessment with automated multisensor techniques. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2011, **7**(7-8), 613-623. DOI: 10.1080/15732479.2010.501542. ISSN 1573-2479. Dostupné také z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15732479.2010.501542>
- [13] MANNING, David G. a Frank B. HOLT. Detecting Delamination in Concrete Bridge Decks. *Concrete International*. 1980, **2**(11), 31-41.
- [14] CLEMENA, Gerardo G. a Wallace T. MCKEEL. Detection of Delamination in Bridge Decks with Infrared Thermography. *Transportation Research Record*. 1978, (664), 180-182.
- [15] WASHER, Glenn, Richard FENWICK, Seth NELSON a Rilya RUMBAYAN. Guidelines for Thermographic Inspection of Concrete Bridge Components in Shaded Conditions. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2013, **2360**(1), 13-20. DOI: 10.3141/2360-02. ISSN 0361-1981. Dostupné také z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.3141/2360-02>
- [16] COTIČ, Patricia, Dejan KOLARIČ, Violeta Bokan BOSILJKOV, Vlatko BOSILJKOV a Zvonko JAGLIČIĆ. Determination of the applicability and limits of void and delamination detection in concrete structures using infrared thermography. *NDT&E International*. 2015, **74**, 87-93. DOI: 10.1016/j.ndteint.2015.05.003. ISSN 0963-8695. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0963869515000559>

- [17] WATASE, Azusa, Recep BIRGUL, Shuhei HIASA, Masato MATSUMOTO, Koji MITANI a F. Necati CATBAS. Practical identification of favorable time windows for infrared thermography for concrete bridge evaluation. *Construction and Building Materials*. 2015, **101**, 1016-1030. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.156. ISSN 0950-0618. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061815305808>
- [18] CLARK, M.R., D.M. MCCANN a M.C. FORDE. Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges. *NDT&E International*. 2003, **36**(4), 265-275. DOI: 10.1016/S0963-8695(02)00060-9. ISSN 0963-8695. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0963869502000609>
- [19] JANKŮ, Michal, Ilja BŘEZINA a Jiří GROŠEK. Use of Infrared Thermography to Detect Defects on Concrete Bridges. *Procedia Engineering*. 2017, **190**, 62-69. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.308. ISSN 1877-7058. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705817324487>
- [20] WASHER, Glenn, Richard FENWICK a Naveen BOLLENI. Effects of Solar Loading on Infrared Imaging of Subsurface Features in Concrete. *Journal of Bridge Engineering*. 2010, **15**(4), 384-390. DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000117. ISSN 1084-0702. Dostupné také z: [http://ascelibrary.org/doi/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000117](http://ascelibrary.org/doi/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000117)
- [21] MAIERHOFER, Ch., R. ARNDT a M. RÖLLIG. Influence of concrete properties on the detection of voids with impulse-thermography. *Infrared Physics & Technology*. 2007, **49**(3), 213-217. DOI: 10.1016/j.infrared.2006.06.007. ISSN 1350-4495. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1350449506000788>
- [22] FARRAG, Sharef, Sherif YEHIA a Nasser QADDOUMI. Investigation of Mix-Variation Effect on Defect-Detection Ability Using Infrared Thermography as a Nondestructive Evaluation Technique. *Journal of Bridge Engineering*. 2016, **21**(3), 1-15. DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000779. ISSN 1084-0702. Dostupné také z: [http://ascelibrary.org/doi/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000779](http://ascelibrary.org/doi/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000779)
- [23] WAI-LOK LAI, Wallace, Xavier DÉROBERT a Peter ANNAN. A review of Ground Penetrating Radar application in civil engineering: A 30-year journey from Locating and Testing to Imaging and Diagnosis. *NDT&E International*. 2018, **96**, 58-78. DOI: 10.1016/j.ndteint.2017.04.002. ISSN 0963-8695. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0963869517300178>
- [24] HUGENSCHMIDT, Johannes. Concrete bridge inspection with a mobile GPR system. *Construction and Building Materials*. 2002, **16**(3), 147-154. DOI: 10.1016/S0950-0618(02)00015-6. ISSN 0950-0618. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061802000156>

- [25] HUGENSCHMIDT, Johannes a Roman MASTRANGELO. GPR inspection of concrete bridges. *Cement and Concrete Composites*. 2006, **28**(4), 384-392. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2006.02.016. ISSN 0958-9465. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946506000473>
- [26] ALANI, Amir M. a Fabio TOSTI. GPR applications in structural detailing of a major tunnel using different frequency antenna systems. *Construction and Building Materials*. 2018, **158**, 1111-1122. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.100. ISSN 0950-0618. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061817319220>
- [27] FAUCHARD, C., X. DÉROBERT, J. CARIOU a Ph. CÔTE. GPR performances for thickness calibration on road test sites. *NDT&E International*. 2003, **36**(2), 67-75. DOI: 10.1016/S0963-8695(02)00090-7. ISSN 0963-8695. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0963869502000907>
- [28] STRYK, Josef, Radek MATULA, Karel POSPÍŠIL, X. DÉROBERT, J.M. SIMONIN a A.M. ALANI. Comparative measurements of ground penetrating radars used for road and bridge diagnostics in the Czech Republic and France. *Construction and Building Materials*. 2017, **154**, 1199-1206. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.134. ISSN 0950-0618. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061817312588>
- [29] SOLLA, M., H. LORENZO, F.I. RIAL a A. NOVO. GPR evaluation of the Roman masonry arch bridge of Lugo (Spain). 2011, **44**(1), 8-12. DOI: 10.1016/j.ndteint.2010.08.004. ISSN 0963-8695. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0963869510001052>
- [30] CARPENTIER, S., M. KONZ, R. FISCHER, G. ANAGNOSTOPOULOS, K. MEUSBURGER a K. SCHOECK. Geophysical imaging of shallow subsurface topography and its implication for shallow landslide susceptibility in the Urseren Valley, Switzerland. *Journal of Applied Geophysics*. 2012, **83**, 46-56. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2012.05.001. ISSN 0926-9851. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092698511200078X>
- [31] BARRILE, Vincenzo a Raffaele PUCINOTTI. Application of radar technology to reinforced concrete structures: a case study. *NDT&E International*. 2005, **38**(7), 596-604. DOI: 10.1016/j.ndteint.2005.02.003. ISSN 0963-8695. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0963869505000435>
- [32] ANTON, Ondřej, Petr CIKRLÉ a Věra HEŘMÁNKOVÁ. Zkušenosti s georadarem při stavebně technických průzkumech. *TZB-info* [online]. 2014 [cit. 2019-02-22]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/10800-zkusenosti-s-georadarem-pri-stavebne-technickyh-pruzkumech>
- [33] STRYK, Josef, Radek MATULA a Karel POSPISIL. Possibilities of ground penetrating radar usage within acceptance tests of rigid pavements. *Journal of Applied Geophysics*. 2013, **97**, 11-26. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2013.06.013. ISSN 0926-9851. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926985113001304>

- [34] CIKRLE, Petr, Dalibor KOCÁB a Ondřej POSPÍCHAL. Zkoušení betonu ultrazvukovou impulsovou metodou. *Beton TKS*. Praha, 2013, **13**(3), 74-79. ISSN 1213-3116.
- [35] ANTON, Ondřej a Petr CIKRLE. Betonové konstrukce památek a hodnocení na základě užití NDT metod. *TZB-info* [online]. 29.8.2016 [cit. 2019-02-22]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/14612-betonove-konstrukce-pamatek-a-hodnoceni-na-zaklade-uziti-ndt-metod>
- [36] PETRO, John T. a Jubum KIM. Detection of delamination in concrete using ultrasonic pulse velocity test. *Construction and Building Materials*. 2011, **26**, 574-582. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.06.060. ISSN 0950-0618. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061811003230>
- [37] CASSIDY, Nigel J., Rod EDDIES a Sam DODS. Void detection beneath reinforced concrete sections: The practical application of ground-penetrating radar and ultrasonic techniques. *Journal of Applied Geophysics*. 2011, **74**(4), 263-276. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2011.06.003. ISSN 0926-9851. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926985111001029>
- [38] KRAUSE, Martin, Klaus MAYER, Martin FRIESE, Boris MILMANN, Frank MIELENTZ a Gregor BALLIER. Progress in ultrasonic tendon duct imaging. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2011, **15**(4), 461-485. DOI: 10.1080/19648189.2011.9693341. ISSN 1964-8189. Dostupné také z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19648189.2011.9693341>
- [39] KRAUSE, Martin. Localization of grouting faults in post tensioned concrete structures. *Non-destructive assessment of concrete structures: Reliability and limits of single and combined techniques: State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 207-INR*. Dordrecht: Springer, 2012, s. 263-304. ISBN 978-94-007-2735-9.
- [40] HUGENSCHMIDT, Johannes, Martin KRAUSE, Denys BREYSSE, Ernst NIEDERLEITHINGER a Alexander TAFFE. Control of thickness/dimensions of pavements, foundations, elements and piles. *Non-destructive assessment of concrete structures: Reliability and limits of single and combined techniques: State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 207-INR*. Dordrecht: Springer, 2012, s. 187-226. ISBN 978-94-007-2735-9.
- [41] TP 72. *Diagnostický průzkum mostů PK*. Praha: Ministerstvo dopravy České republiky, 2009.
- [42] ČSN 73 6221. *Prohlídka mostů pozemních komunikací*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [43] ČSN 73 2011. *Nedestruktivní zkoušení betonových konstrukcí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [44] ČSN 73 1373. *Nedestruktivní zkoušení betonu – Tvrdoměrné metody zkoušení betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [45] ČSN EN 12504-2. *Zkoušení betonu v konstrukcích – Část 2: Nedestruktivní zkoušení – Stanovení tvrdosti odrazovým tvrdoměrem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.



- [46] ČSN 73 1371. *Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [47] ČSN EN 12504-4. *Zkoušení betonu – Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [48] ČSN EN 16714-1. *Nedestruktivní zkoušení – Termografické zkoušení – Část 1: Obecné postupy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [49] ČSN EN 16714-2. *Nedestruktivní zkoušení – Termografické zkoušení – Část 2: Přístroje*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [50] ČSN EN 16714-3. *Nedestruktivní zkoušení – Termografické zkoušení – Část 3: Termíny a definice*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [51] ČSN ISO 18434-1. *Monitorování stavu a diagnostika strojů – Termografie – Část 1: Všeobecné postupy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [52] ASTM D4788 - 03(2013). *Standard Test Method for Detecting Delaminations in Bridge Decks Using Infrared Thermography*. West Conshohocken, PA (USA): ASTM International, 2013.
- [53] ASTM D6087-08(2015)e1. *Standard Test Method for Evaluating Asphalt-Covered Concrete Bridge Decks Using Ground Penetrating Radar*. West Conshohocken, PA (USA): ASTM International, 2015.
- [54] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Betonový most přes Rokytku (Zenklova) [online]. c2018 [citováno 16. 08. 2019]. Dostupný z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Betonov%C3%BD\\_most\\_p%C5%99es\\_Rokytku\\_\(Zenklova\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Betonov%C3%BD_most_p%C5%99es_Rokytku_(Zenklova))
- [55] ZÁZVORKA, Petr. S mostem ve znaku. *Stavebnictví* [online]. 2010, (9) [cit. 2019-03-13]. Dostupné z: [https://www.casopisstavebnictvi.cz/s-mostem-ve-znaku\\_N3782](https://www.casopisstavebnictvi.cz/s-mostem-ve-znaku_N3782)
- [56] TEICHMAN, Miroslav a Vladimír ŠKOCH. Správa železničních mostních objektů. In: *18. Mezinárodní symposium Mosty 2013*. Brno: Sekurkon, 2013, s. 15-19. ISBN 978-80-86604-60-2.
- [57] Silniční databanka a NDIC. *Ředitelství silnic a dálnic ČR* [online]. Ostrava: Odbor silniční databanky a NDIC, 2015 [cit. 2019-03-13]. Dostupné z: <https://www.rsd.cz/wps/portal/web/rsd/Silnicni-databanka>
- [58] *Systém hospodaření s mosty* [online]. Brno: Vars, 2019 [cit. 2019-03-13]. Dostupné z: <http://bms.clevera.cz>
- [59] MENŠÍK, František. Potřeba zlepšení stavu mostů v ČR - 20 let marných pokusů. In: *19. Mezinárodní symposium Mosty 2014*. Brno: Sekurkon, 2014, s. 29-31. ISBN 978-80-86604-62-6.
- [60] TOMEK, Jan. Prohlídky mostních objektů pozemních komunikací v ČR. In: *22. Mezinárodní symposium Mosty 2017*. Brno: Sekurkon, 2017, s. 64-67. ISBN 978-80-86604-71-8.
- [61] Mosty ve správě SŽDC jsou bezpečné. *Správa železniční dopravní cesty* [online]. Praha, 30. 8. 2018 [cit. 2019-03-13]. Dostupné z: <https://www.szdc.cz/pro-media/tiskove-zpravy/bezpecne-mosty-szdc.html>

- [62] HRDLIČKA, Libor a Pavel SIMON. TP 260 Přímé pojižděné mosty pozemních komunikací. In: 22. *Mezinárodní symposium Mosty 2017*. Brno: Sekurkon, 2017, s. 74-79. ISBN 978-80-86604-71-8.
- [63] JANKŮ, Michal a Josef STRYK, *Uplatnění termografie při diagnostice objektů dopravní infrastruktury: Certifikovaná metodika*. Brno: Centrum dopravního výzkumu, v. v. i., 2018. ISBN 978-80-88074-34-2.
- [64] Schmidt rebound hammers for concrete strength and rock testing. *Proceq* [online]. Schwerzenbach, Švýcarsko: Proceq, 2019 [cit. 2019-10-01]. Dostupné z: <https://www.proceq.com/compare/schmidt-hammers/>
- [65] CIKRLE, Petr a Ondřej ANTON. Vývoj nedestruktivních metod pro zkoušení betonu od roku 1990. *Beton TKS*. Praha, 2015, **15**(3), 3-7. ISSN 1213-3116.
- [66] GARNIER, Vincent. Ultrasounds through transmission. *Non-Destructive Assessment of Concrete Structures: Reliability and Limits of Single and Combined Techniques: State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 207-INR*. 1. Dordrecht: Springer, 2012, s. 17-27. ISBN 978-94-007-2735-9.
- [67] SYSTÉM PS 1000 X-SCAN. *HILTI* [online]. [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: <https://www.hilti.cz>
- [68] ANTON, Ondřej, Petr CIKRLE a Věra HEŘMÁNKOVÁ. Zkušenosti s georadarem při stavebně technických průzkumech. *TZB-info* [online]. 27. 1. 2014 [cit. 2019-04-29]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/10800-zkusenosti-s-georadarem-pri-stavebne-technickych-pruzkumech>
- [69] BARR, E. Scott. Historical Survey of the Early Development of the Infrared Spectral Region. *American Journal of Physics*. 1960, **28**(1), 42-54. DOI: 10.1119/1.1934975. ISSN 0002-9505. Dostupné také z: <http://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.1934975>
- [70] BARR, E.Scott. The infrared pioneers—I. Sir William Herschel. *Infrared Physics*. 1961, **1**(1), 1-IN6. DOI: 10.1016/0020-0891(61)90037-9. ISSN 0020-0891. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0020089161900379>
- [71] HERSCHEL, William. Experiments on the refrangibility of the invisible rays of the sun. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 1800, **90**, 284-292. DOI: 10.1098/rstl.1800.0015. ISSN 0261-0523. Dostupné také z: <http://www.royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rstl.1800.0015>
- [72] MEOLA, Carosela. Origin and Theory of Infrared Thermography. MEOLA, Carosena, ed. *Infrared thermography: Recent advances and future trends*. Bentham eBooks, 2012, s. 3-28. ISBN 978-1-60805-521-0. Dostupné také z: <https://ebooks.benthamscience.com/book/9781608051434/>
- [73] SEEBECK, T. J. Ueber die magnetische Polarisation der Metalle und Erze durch Temperatur-Differenz. *Annalen der Physik*. 1826, **82**(2), 133-160. DOI: 10.1002/andp.18260820202. ISSN 0003-3804. Dostupné také z: <http://doi.wiley.com/10.1002/andp.18260820202>
- [74] BARR, E.Scott. The Infrared Pioneers—II. Macedonio Melloni. *Infrared Physics*. 1962, **2**(2), 67-74. DOI: 10.1016/0020-0891(62)90023-4. ISSN 0020-0891. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0020089162900234>

- [75] ROGALSKI, A. History of infrared detectors. *Opto-Electronics Review*. 2012, **20**(3), 279–308. DOI: 10.2478/s11772-012-0037-7. ISSN 1896-3757. Dostupné také z: <http://www.degruyter.com/view/j/oere.2012.20.issue-3/s11772-012-0037-7/s11772-012-0037-7.xml>
- [76] KYLILI, Angeliki, Paris A. FOKAIDES, Petros CHRISTOU a Soteris A. KALOGIROU. Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: A review. *Applied Energy*. 2014, **134**, 531–549. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.08.005. ISSN 0306-2619. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261914008083>
- [77] KIRCHHOFF, G. Ueber das Verhältniss zwischen dem Emissionsvermögen und dem Absorptionsvermögen der Körper für Wärme und Licht. *Annalen der Physik und Chemie*. 1860, **185**(2), 275–301. DOI: 10.1002/andp.18601850205. ISSN 0003-3804. Dostupné také z: <http://doi.wiley.com/10.1002/andp.18601850205>
- [78] STEFAN, Josef. Über die Beziehung zwischen der Wärmestrahlung und der Temperatur. *Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften in Wien*. 1879, **79**, 391–428.
- [79] LANGLEY, S. P. The Bolometer and Radiant Energy. *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences*. 1880, **16**. DOI: 10.2307/25138616. ISSN 0199-9818. Dostupné také z: <https://www.jstor.org/stable/25138616>
- [80] BARR, E.Scott. The infrared pioneers—III. Samuel Pierpont Langley. *Infrared Physics*. 1963, **3**(4), 195–206. DOI: 10.1016/0020-0891(63)90024-1. ISSN 0020-0891. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0020089163900241>
- [81] PLANCK, Max. Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum. *Annalen der Physik*. 1901, **309**(3), 553–563. DOI: 10.1002/andp.19013090310. ISSN 0003-3804. Dostupné také z: <http://doi.wiley.com/10.1002/andp.19013090310>
- [82] PLANCKOVA KONSTANTA – KE ČTENÍ. *Aldebaran Group for Astrophysics* [online]. Praha [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: [https://www.aldebaran.cz/lab/planck/2\\_cteni\\_2.php](https://www.aldebaran.cz/lab/planck/2_cteni_2.php)
- [83] CASE, T. W. Notes on the Change of Resistance of Certain Substances in Light. *Physical Review*. 1917, **9**(4), 305–310. DOI: 10.1103/PhysRev.9.305. ISSN 0031-899X. Dostupné také z: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.9.305>
- [84] Přispěvatelé Wikipedie. *Kálmán Tihanyi*. Wikipedie: Otevřená encyklopedie [online]. Datum poslední revize 10. 4. 2019 [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/K%C3%A1lm%C3%A1n\\_Tihanyi](https://en.wikipedia.org/wiki/K%C3%A1lm%C3%A1n_Tihanyi)
- [85] KADLEC, Karel, 2014. Teoretické základy bezdotykového měření teploty. *Automa* [online]. **20**(2) [cit. 29.4.2018]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: [http://automa.cz/cz/casopis-cislo/automa-2014\\_02/](http://automa.cz/cz/casopis-cislo/automa-2014_02/)
- [86] Konstrukce termokamery. *Termokamera.cz* [online]. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/konstrukce-termokamery/>
- [87] SOVA, Jan a Jana POKORNÁ. Bezdotykové měření teplotních polí – senzory. *Aldebaran Bulletin* [online]. 2018, **16**(2) [cit. 2019-06-13]. ISSN 1214-1674. Dostupné z: [https://www.aldebaran.cz/bulletin/2018\\_02\\_cam.php](https://www.aldebaran.cz/bulletin/2018_02_cam.php)
- [88] TERMOKAMERY FLIR T600, T620, T640 A T660. *W-Technika group s.r.o.* [online]. Praha [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.termokamery-flir.cz/termokamera-flir-t600-t620-t640/>

- [89] ImageIR 10300. *TMV SS* [online]. Praha [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.tmvss.cz/vyrobcii/infratec/imageir-10300>
- [90] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Termografie [online]. c2019 [cit. 2019-04-09]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Termografie&oldid=17546148>
- [91] TP 175. *Stanovení životnosti betonových konstrukcí objektů pozemních komunikací*. Praha: Ministerstvo dopravy České republiky, 2006.
- [92] Karbonatace betonu. eBeton [online]. Praha [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/karbonatace-betonu>
- [93] LYON, S.B., G.E. THOMSON, J.B. JOHNSON, G.C. WOOD a J.M. FERGUSON. Accelerated Atmospheric Corrosion Testing Using a Cyclic Wet/Dry Exposure Test: Aluminum, Galvanized Steel, and Steel. Corrosion. 1987, 43(12), 719-726. Dostupné také z: <https://corrosionjournal.org/doi/10.5006/1.3583858>
- [94] MACHÁČEK, Tomáš. Koroze železobetonových konstrukcí a způsob jejich ochrany. *Silnice Železnice* [online]. Ostrava: KONSTRUKCE Media, 2006, 22. 5. 2006, 1(1) [cit. 2019-07-25]. ISSN 1803-8441. Dostupné z: <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/koroze-zelezobetonovych-konstrukci-a-zpusob-jejich-ochrany>
- [95] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Vypařování [online]. c2017 [cit. 2019-08-16]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Vypa%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD&oldid=15389545>
- [96] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Sluneční energie [online]. c2019 [cit. 2019-08-23]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Slune%C4%8Dn%C3%AD\\_energie&oldid=17478061](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Slune%C4%8Dn%C3%AD_energie&oldid=17478061)
- [97] SOVA, Jan. Bezdotykové měření teplotních polí II. *Aldebaran Bulletin* [online]. 2017, 15(19) [cit. 2019-08-23]. ISSN 1214-1674. Dostupné z: [https://www.aldebaran.cz/bulletin/2017\\_19\\_erm.php](https://www.aldebaran.cz/bulletin/2017_19_erm.php)

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

BMS – Bridge Management System – Systém hospodaření s mosty

CDV – Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.

EM – elektromagnetický

FOV – Field of view – zorné pole

GPR – Ground-penetrating radar – georadar

IFOV – Instantaneous field of view – okamžité zorné pole

IR – Infrared – infračervený

NDT – Nondestructive testing – nedestruktivní zkoušení

ŘSD – Ředitelství silnic a dálnic ČR

SŽDC – Správa železniční dopravní cesty, s. o.

TP – technické podmínky

UZ – ultrazvuk

ŽB – železobetonový



## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Schmidtův odrazový tvrdoměr typu N .....	10
Obr. 2: Silver Schmidt .....	10
Obr. 3: Ultrazvuk Pundit PL-200.....	12
Obr. 4: Přímé prozvučování.....	13
Obr. 5: Polopřímé prozvučování.....	13
Obr. 6: Nepřímé prozvučování – zjišťování hloubky trhlin .....	13
Obr. 7: Ultrazvukový pulse-echo přístroj Pundit PL-200PE .....	14
Obr. 8: Princip měření georadarem, vpravo: radarogram .....	15
Obr. 9: Měření s GPR přístrojem Hilti PS 1000 s pomocí rastru 1200 × 1200 mm.....	17
Obr. 10: Georadarový sken polohy smyková výztuže v trámu mostu .....	17
Obr. 11: Herschelův pokus s rozkladem slunečních paprsků .....	18
Obr. 12: Závislost spektrální hustoty vyzařování abs. černého tělesa na vlnové délce ..	21
Obr. 13: Rozsah spektra infračerveného záření využívaného při měření .....	22
Obr. 14: Blokové schéma termokamery .....	23
Obr. 15: Schéma mikrobolometru.....	24
Obr. 16: Nechlazená termokamera FLIR T640 .....	24
Obr. 17: Chlazená termokamera InfraTec ImageIR 10300 .....	24
Obr. 18: Rozlišení termokamery – zorné pole a okamžité zorné pole.....	26
Obr. 19: Delaminace na povrchu betonového nosníku mostu .....	30
Obr. 20: Koroze ocelové výztuže v betonu.....	31
Obr. 21: Odlupování a delaminace .....	31
Obr. 22: Oddělení vrstvy sanace od betonového podkladu křídla opěry mostu .....	32
Obr. 23: Pokračování původní koroze pod sanovaným ŽB trámem.....	32
Obr. 24: Rozpadlý beton a „jezírko“ na úložném prahu opěry.....	33
Obr. 25: Průsak vody v místě dobetonávky mezi dolními přírubami nosníků I73 .....	33
Obr. 26: Mokrá povrch betonového nosníku mostu od porušené izolace .....	33
Obr. 27: Zátok na úložný práh pravděpodobně porušeným mostním závěrem .....	34
Obr. 28: Sdílení tepla prouděním.....	37
Obr. 29: Vznik teplotního kontrastu v místě poruchy.....	38
Obr. 30: Delaminovaný povrch úložného prahu mostu .....	39
Obr. 31: Měření v ranních hodinách .....	39
Obr. 32: Skladba záření přicházející do termokamery.....	40
Obr. 33: Vliv posprejovaného povrchu na naměřenou teplotu .....	41
Obr. 34: Ukázka vlivu odražené zdánlivé teploty a ostrého úhlu měření .....	42
Obr. 35: Návrh zkušební tělesa.....	43

Obr. 36: Umělé defekty připravené ve formě před betonáží .....	44
Obr. 37: Vibrování betonové směsi během betonáže .....	44
Obr. 38: Zahlazený povrch zkušebního bloku po dokončené betonáží .....	44
Obr. 39: Dokončený zkušební blok .....	44
Obr. 40: Betonové krychle po odzkoušení v lisu.....	45
Obr. 41: Proražená vrstva betonu nad vloženým kusem polystyrénu.....	46
Obr. 42: Graf průměrných odrazů Schmidtova kladívka typu N.....	46
Obr. 43: Tvrdoměr Silver Schmidt .....	46
Obr. 44: Graf odrazů tvrdoměru Silver Schmidt .....	46
Obr. 45: Ultrazvuk TICO od firmy PROCEQ .....	47
Obr. 46: Graf rychlostí průchodů UZ signálu.....	47
Obr. 47: Ultrazvukový pulse-echo přístroj Pundit PL-200PE .....	48
Obr. 48: Křivka UZ signálu s vyznačeným rozhraním na spodní ploše bloku.....	49
Obr. 49: Plošný sken s lokalizovanými defekty na celou tloušťku bloku .....	49
Obr. 50: Plošný sken s horní vrstvou umělých defektů .....	50
Obr. 51: Měřicí jednotka georadaru GSSI a 2,6 GHz anténa v měřicím vozičku .....	51
Obr. 52: Zpracování radarogramů .....	52
Obr. 53: Georadar GSSI, anténa 2,6 GHz, strana A betonového bloku .....	53
Obr. 54: Georadar GSSI, anténa 1,6 GHz, strana A betonového bloku .....	53
Obr. 55: Georadar GSSI, anténa 2,6 GHz, strana B betonového bloku.....	54
Obr. 56: Georadar GSSI, anténa 1,6 GHz, strana B betonového bloku.....	54
Obr. 57: Georadar Hilti PS 1000 .....	55
Obr. 58: Schéma měření – čtvercová plocha 1 a 2 .....	56
Obr. 59: 3-D pohled – měřená plocha 2.....	56
Obr. 60: Plošný sken: měřená čtvercová plocha 1 (vlevo) a 2 (vpravo).....	56
Obr. 61: Georadar Proceq GPR Live na zkušebním bloku.....	57
Obr. 62: Neupravený liniový sken – strana B betonového bloku, měřeno ve směru y ..	58
Obr. 63: Liniový sken po automatické úpravě – strana B, měřeno ve směru y .....	58
Obr. 64: Plošný sken – strana A, měřeno v pravém horním rohu.....	59
Obr. 65: Plošný sken – strana B, měřeno v levém horním rohu .....	59
Obr. 66: Zobrazení plošného skenu na povrchu zk. bloku s využitím rozšířené reality.	60
Obr. 67: Termokamera FLIR A615 .....	61
Obr. 68: Graf průběhů teplot ve stínu, strana A betonového bloku.....	62
Obr. 69: Graf teplotních kontrastů ve stínu, strana A betonového bloku .....	62
Obr. 70: Termogram zkušebního betonového bloku (strana A), čas měření 5:00.....	63
Obr. 71: Termogram zkušebního betonového bloku (strana A), čas měření 8:00.....	63

Obr. 72: Termogram zkušebního betonového bloku (strana A), čas měření 12:00.....	63
Obr. 73: Termogram strany B betonového zkušebního bloku.....	64
Obr. 74: Graf průběhů teplot na slunci, strana A betonového bloku .....	65
Obr. 75: Graf teplotních kontrastů na slunci, strana A betonového bloku .....	65
Obr. 76: Termogram betonového bloku, čas měření 5:00 .....	66
Obr. 77: Termogram betonového bloku, čas měření 12:00 .....	66
Obr. 78: Termogram betonového bloku, čas měření 16:00 .....	66
Obr. 79: Odběr jádrových mikro-vývrtů ze strany B betonového bloku .....	67
Obr. 80: Jádrové mikro-vývrty ze strany A betonového bloku .....	67
Obr. 81: Jádrové mikro-vývrty ze strany B betonového bloku.....	68
Obr. 82: Číslování vložených defektů: strana A (vlevo) a strana B (vpravo).....	69
Obr. 83: Zkoumaný most 50-003..2 v městské části Brno-Slatina .....	71
Obr. 84: Mapa s vyznačenou polohou mostu.....	71
Obr. 85: Opěra mostu č. 1 .....	72
Obr. 86: Opěra mostu č. 2 .....	72
Obr. 87: Měřená plocha na opěře č. 1 .....	72
Obr. 88: Měřená plocha na opěře č. 2 .....	72
Obr. 89: Termogram betonového nosníku na opěře č. 1 .....	73
Obr. 90: Termogram betonového nosníku nad opěrou č. 2 .....	73
Obr. 91: Měření nosníku pomocí georadaru GSSI .....	74
Obr. 92: Radarogramy z nosníku nad opěrou č. 1 .....	75
Obr. 93: Liniový sken ve směru osy x, nosník nad opěrou č. 1 .....	76
Obr. 94: 3-D sken výztuže nosníku nad opěrou č. 1 .....	76
Obr. 95: 3-D sken kabelových kanálků nad opěrou č. 1 .....	76
Obr. 96: Liniový sken nosníku ve směru osy x nad opěrou č. 2.....	77
Obr. 97: Plošný sken nosníku nad opěrou č. 2.....	77
Obr. 98: Měření ŽB nosníku mostu georadarem Proceq .....	78
Obr. 99: Plošný sken nosníku nad opěrou č. 1 v hloubce 0-1 cm.....	79
Obr. 100: Plošný sken nosníku nad opěrou č. 2 v hloubce 0-1 cm.....	79
Obr. 101: Liniový sken nosníku ve směru osy x nad opěrou č. 1 .....	79
Obr. 102: Liniový sken nosníku ve směru osy y nad opěrou č. 1 .....	79
Obr. 103: Plošný sken výztuže nosníku nad opěrou č. 1 .....	79
Obr. 104: Plošný sken kabelových kanálků nosníku nad opěrou č. 1.....	79
Obr. 105: Liniový sken ve směru osy y nad opěrou č. 2 .....	80
Obr. 106: Liniový sken ve směru osy y nad opěrou č. 2 - po automatické úpravě.....	80
Obr. 107: Plošný sken výztuže nosníku nad opěrou č. 2 .....	80

Obr. 108: Plošný sken kabelových kanálků nosníku nad opěrou č. 1 .....	80
Obr. 109: Plošný sken nosníku mostu nad opěrou č. 1 .....	81
Obr. 110: Detail otvoru po jádrovém mikro-vývrtu, nosník nad opěrou č. 1 .....	82
Obr. 111: Měření tloušťky jádrového mikro-vývrtu, nosník nad opěrou č. 1 .....	82
Obr. 112: Rozložení jádrového mikro-vývrtu a sondy na nosníku nad opěrou č. 2 .....	83
Obr. 113: Detail otvoru po jádrovém mikro-vývrtu, nosník nad opěrou č. 2 .....	83
Obr. 114: Měření tloušťky jádrového mikro-vývrtu, nosník nad opěrou č. 2 .....	83
Obr. 115: Sonda v nosníku nad opěrou č. 2.....	83
Obr. 116: Detail zkorodované výztuže v provedené sondě .....	83
Obr. 117: Předpjatý nosník mostu s delaminovaným povrchem, ev. č. mostu 3833-1 ..	84
Obr. 118: Delaminace na spodní části úložného prahu opěry, ev. č. mostu 42-011.2....	85
Obr. 119: Delaminace povrchu úložného prahu opěry, ev. č. mostu 42-011.2 .....	85
Obr. 120: Dva stejné termogramy s odlišně nastaveným teplotním rozsahem.....	86
Obr. 121: Delaminace na povrchu pilíře, ev. č. mostu D1-075.1 .....	87
Obr. 122: Delaminace na povrchu úložného prahu, ev. č. mostu 42-011.2.....	87
Obr. 123: Delaminace na povrchu nosníku, ev. č. mostu 50-007 .....	87
Obr. 124: Určení obsahu delaminované plochy.....	87

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Hodnoty emisivit vybraných materiálů .....	23
Tabulka 2: Parametry vybraných modelů nechlazených termokamer .....	25
Tabulka 3: Materiálové vlastnosti (při teplotě 20 °C) .....	45
Tabulka 4: Parametry použitých georadarových antén.....	50
Tabulka 5: Parametry použitých termokamer.....	61
Tabulka 6: Naměřené hloubky vložených defektů pod stranou A betonového bloku ....	70
Tabulka 7: Naměřené hloubky vložených defektů pod stranou B betonového bloku ....	70



## SEZNAM PŘÍLOH

### PŘÍLOHA A – MĚŘENÍ NA ZKUŠEBNÍM BLOKU

- Příloha A.1 – Metoda pulse-echo
- Příloha A.2 – Georadar GSSI
- Příloha A.3 – Georadar Hilti
- Příloha A.4 – Georadar Proceq GP8000
- Příloha A.5 – Termokamera
- Příloha A.6 – Odběr jádrových mikro-vývrtů

### PŘÍLOHA B – MĚŘENÍ NA BETONOVÉM MOSTĚ

- Příloha B.1 – Termografie
- Příloha B.2 – Georadar GSSI
- Příloha B.3 – Georadar Proceq GP8000
- Příloha B.4 – Jádrové mikro-vývrty

### PŘÍLOHA C – TERMOGRAMY DALŠÍCH MOSTŮ

- Příloha C.1 – Most 50-003..2
- Příloha C.2 – Most 50-003..1
- Příloha C.3 – Most BM-T590
- Příloha C.4 – Most 50-007
- Příloha C.5 – Most 42-006
- Příloha C.6 – Most 3833-1
- Příloha C.7 – Most 52-023..3

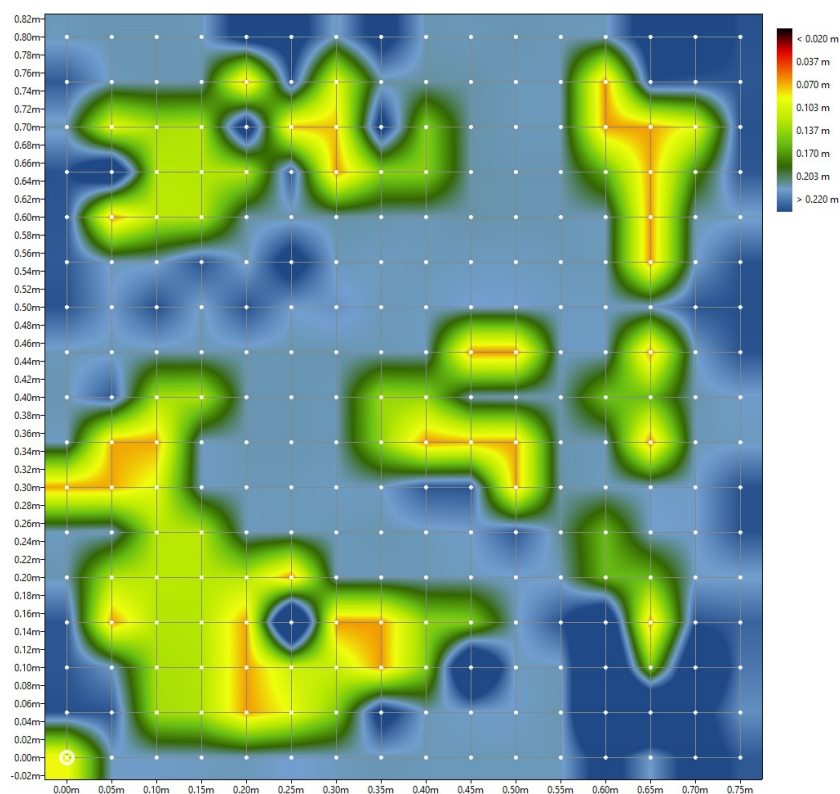


## PŘÍLOHA A – MĚŘENÍ NA ZKUŠEBNÍM BLOKU

### PŘÍLOHA A.1 – METODA PULSE-ECHO



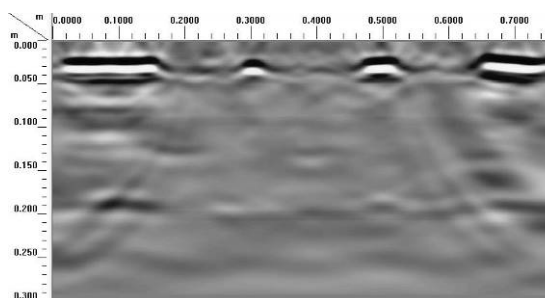
*Otáčení zkušebního bloku za účelem měření na jeho druhé straně*



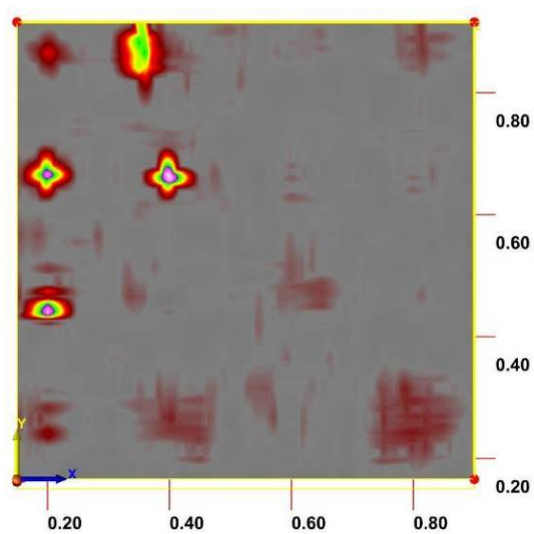
*Plošný sken strany A zkušebního bloku – vložené defekty se nepodařilo identifikovat*

## PŘÍLOHA A.2 – GEORADAR GSSI

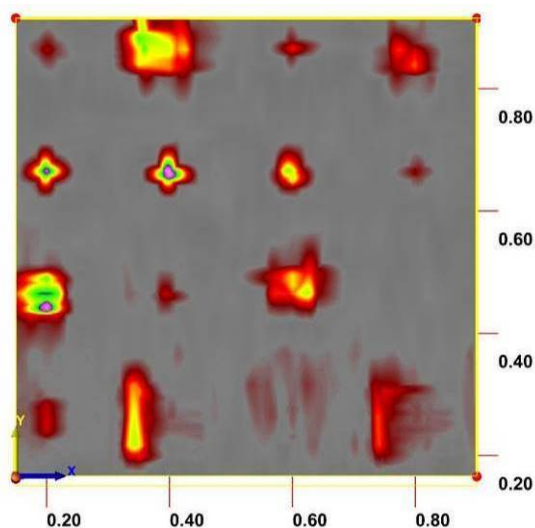
Anténa 2,6 GHz, strana A betonového bloku



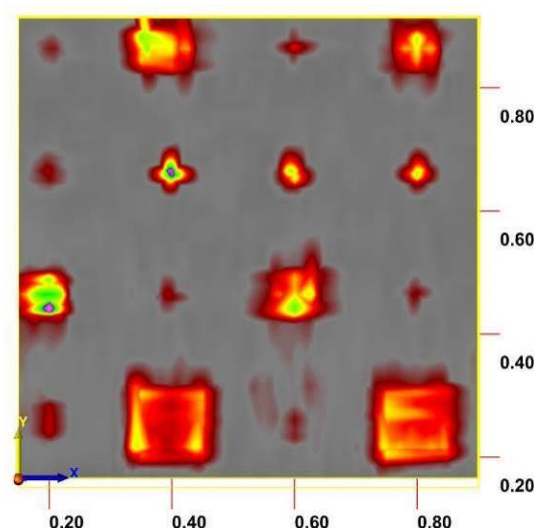
*Liniový sken ve směru osy y*



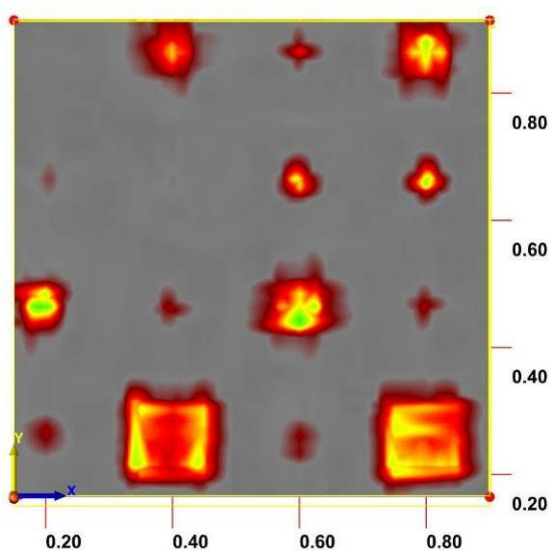
*Plošný sken v hloubce 1 cm*



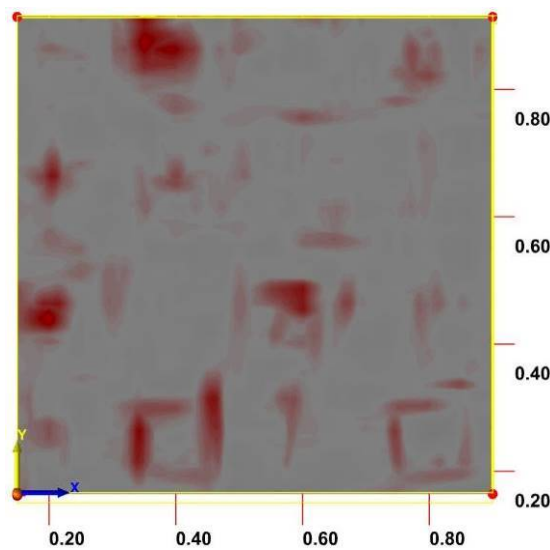
*Plošný sken v hloubce 2 cm*



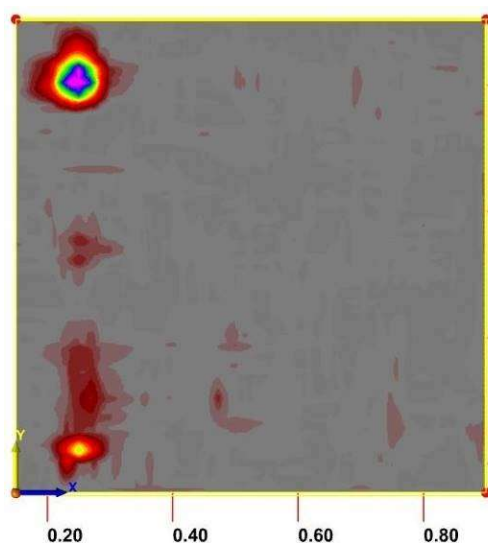
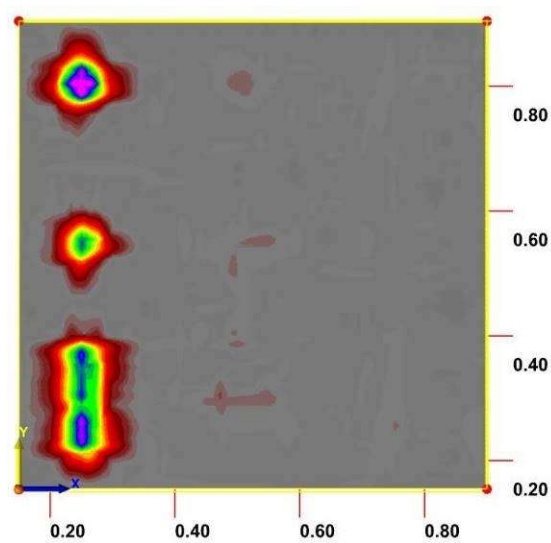
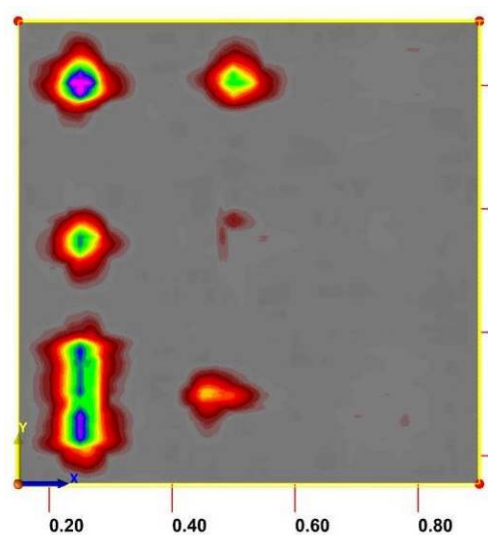
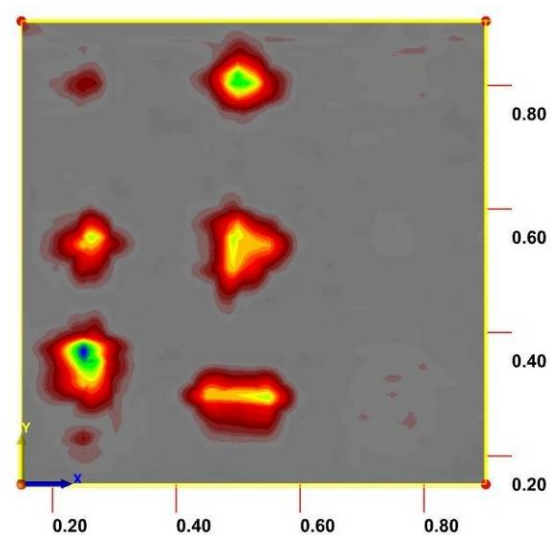
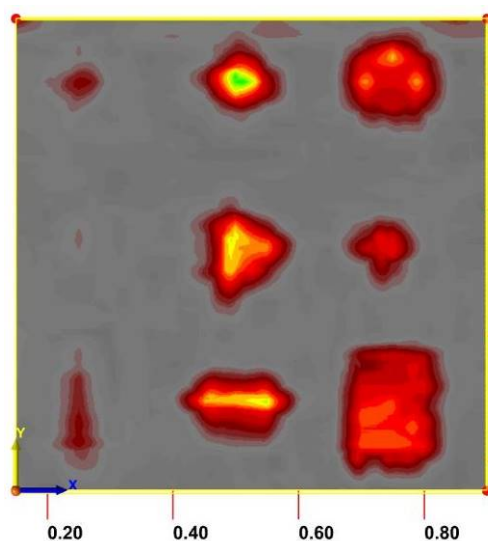
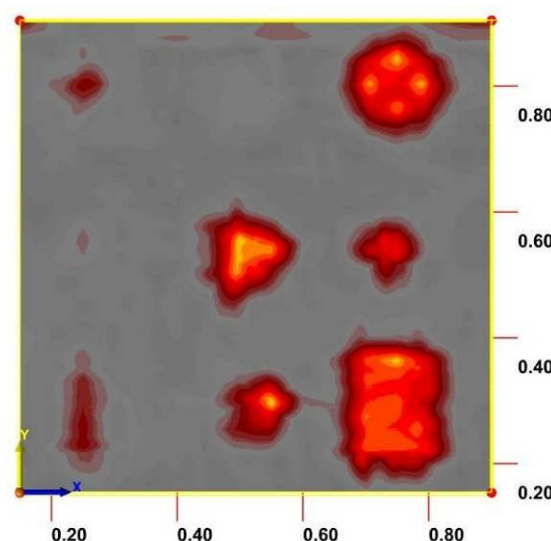
*Plošný sken v hloubce 3 cm*



*Plošný sken v hloubce 4 cm*

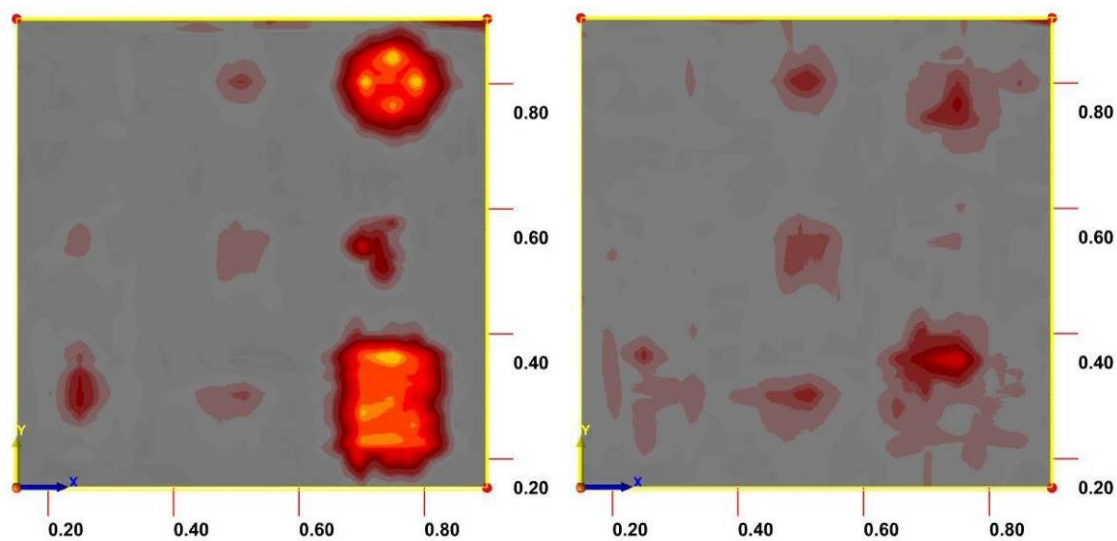


*Plošný sken v hloubce 5 cm*

**Anténa 2,6 GHz, strana B betonového bloku***Plošný sken v hloubce 3 cm**Plošný sken v hloubce 4 cm**Plošný sken v hloubce 5 cm**Plošný sken v hloubce 6 cm**Plošný sken v hloubce 7 cm**Plošný sken v hloubce 8 cm*

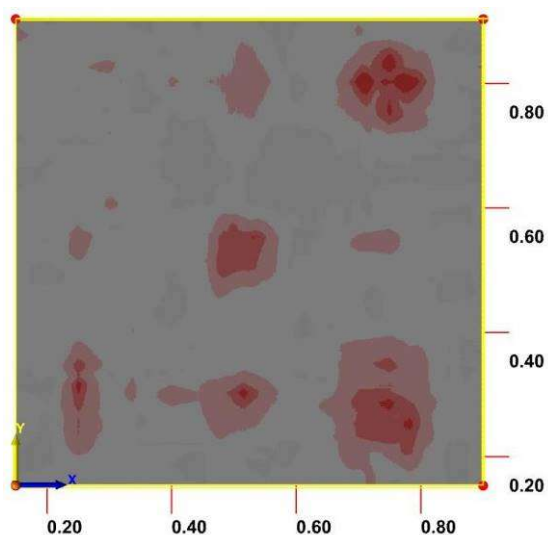


### Anténa 2,6 GHz, strana B betonového bloku



*Plošný sken v hloubce 9 cm*

*Plošný sken v hloubce 10 cm*



*Plošný sken v hloubce 11 cm*

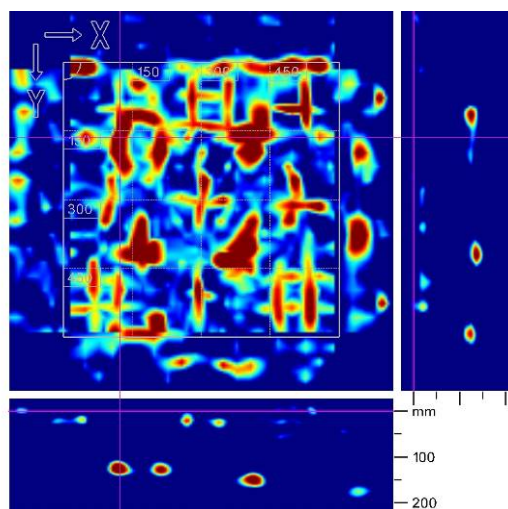


*Detail měřicího vozíčku*

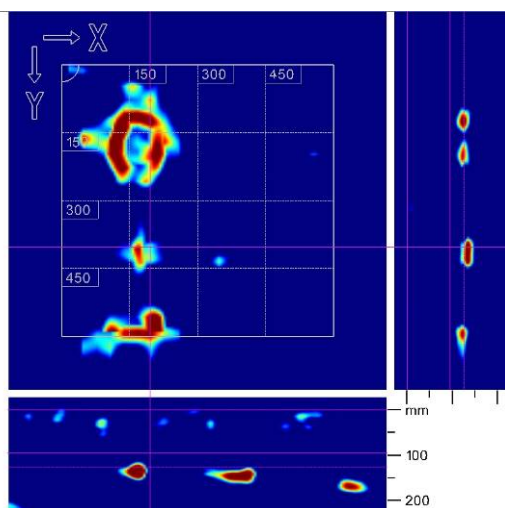
## PŘÍLOHA A.3 – GEORADAR HILTI



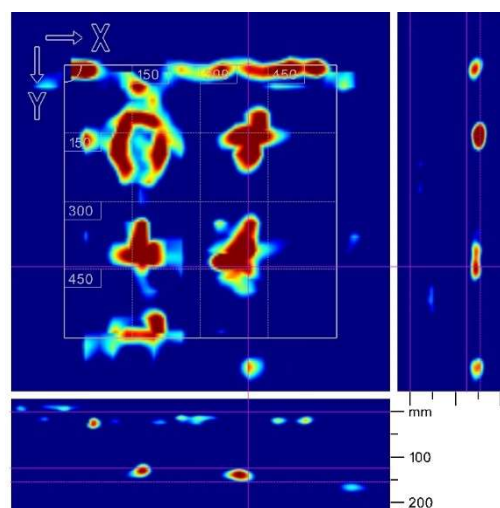
*Měření plochy 1 o rozměru 60 × 60 cm*



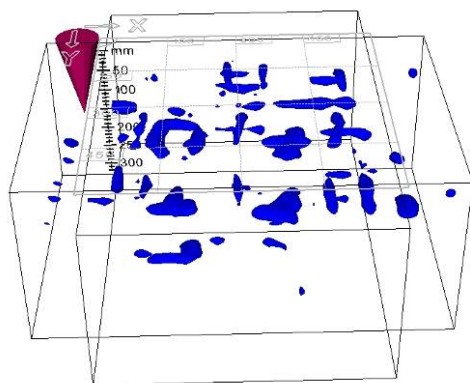
*Sken plochy 1 na celou tloušťku bloku*



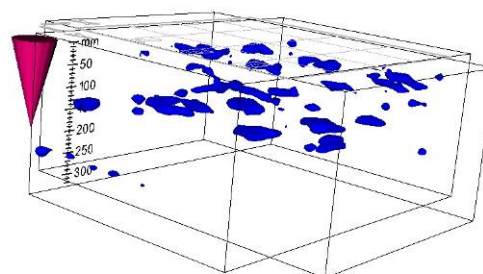
*Sken plochy 1 v hloubce 9 až 13 cm*



*Sken plochy 1 v hloubce 12 až 16 cm*



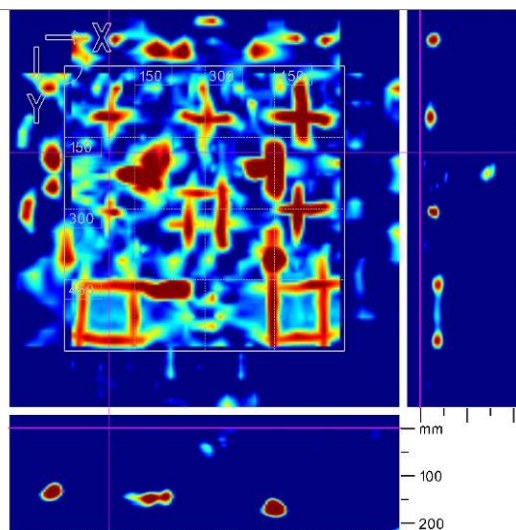
*3-D sken v ploše 1*



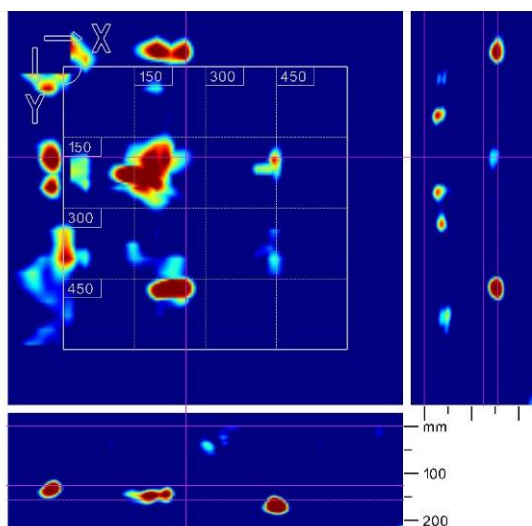
*3-D sken v ploše 1*



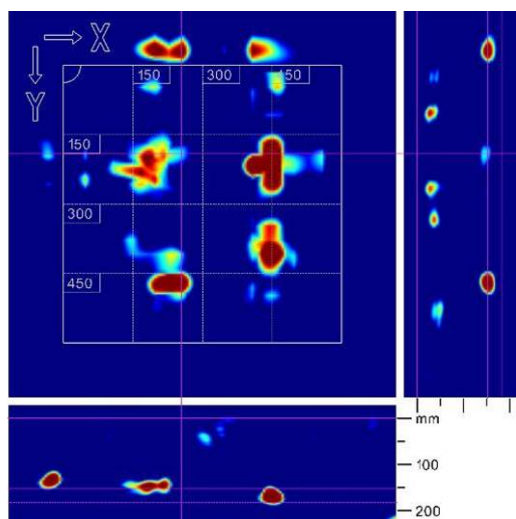
Měření plochy 2 o rozměru  $60 \times 60$  cm



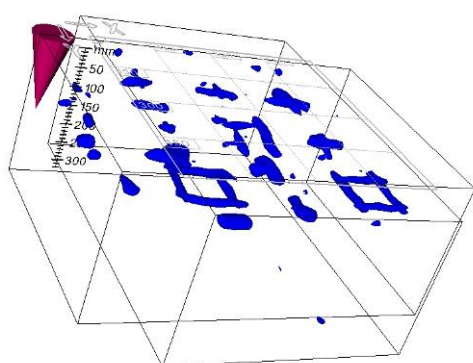
Sken plochy 2 na celou tloušťku bloku



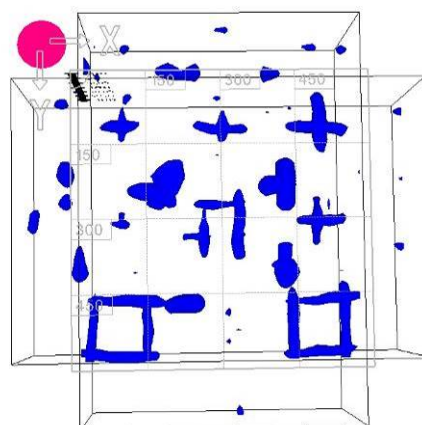
Sken plochy 2 v hloubce 12 až 16 cm



Sken plochy 1 v hloubce 15 až 18 cm



3-D sken v ploše 2

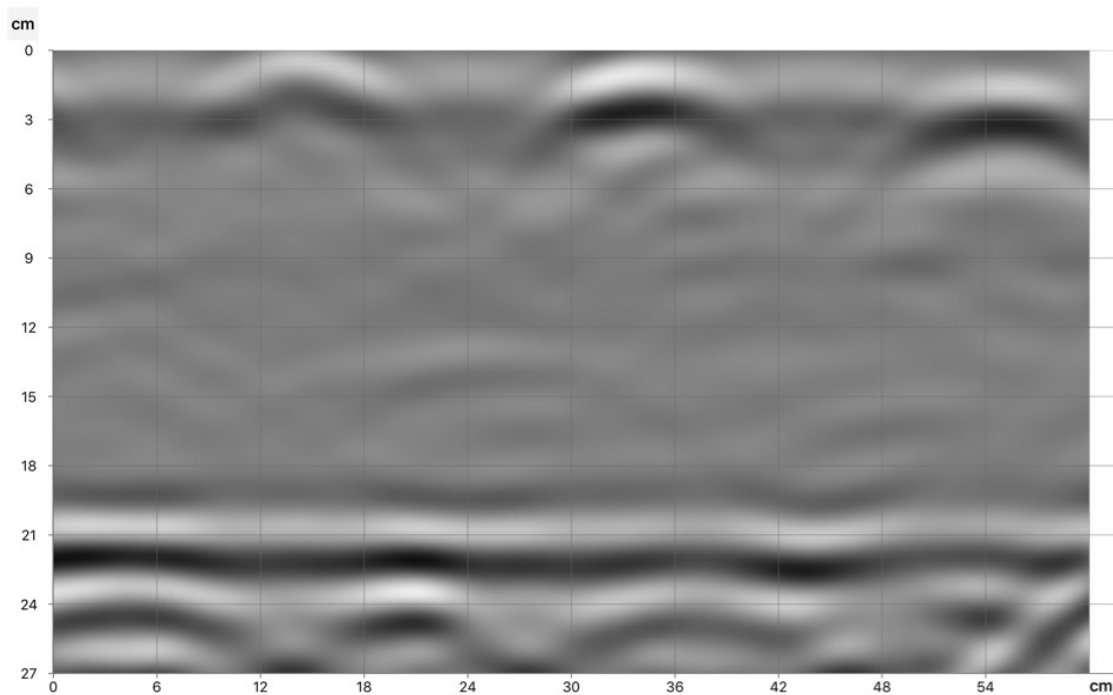


3-D sken v ploše 2

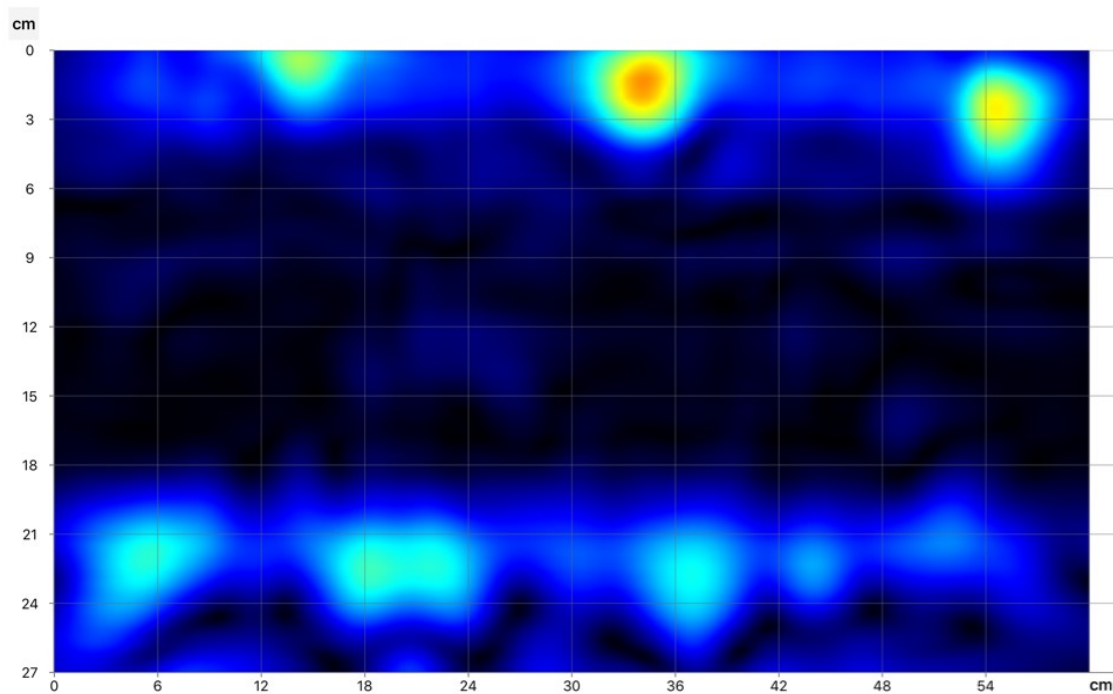


## PŘÍLOHA A.4 - GEORADAR PROCEQ GP8000

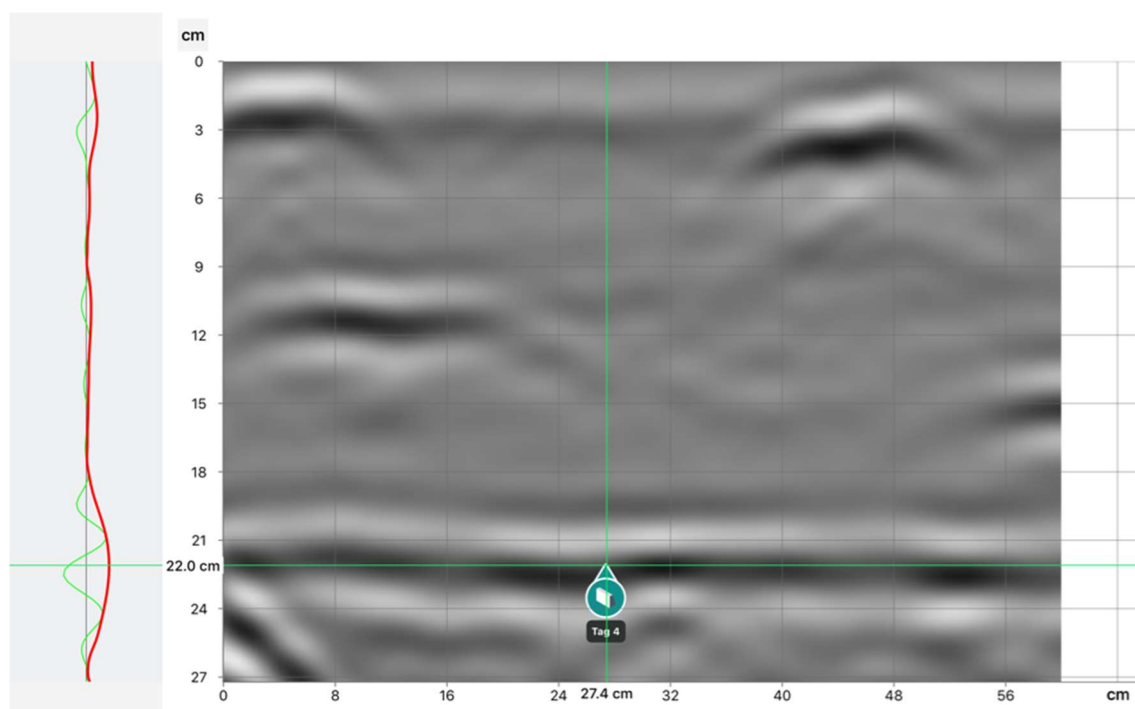
### Strana A betonového zkušebního bloku



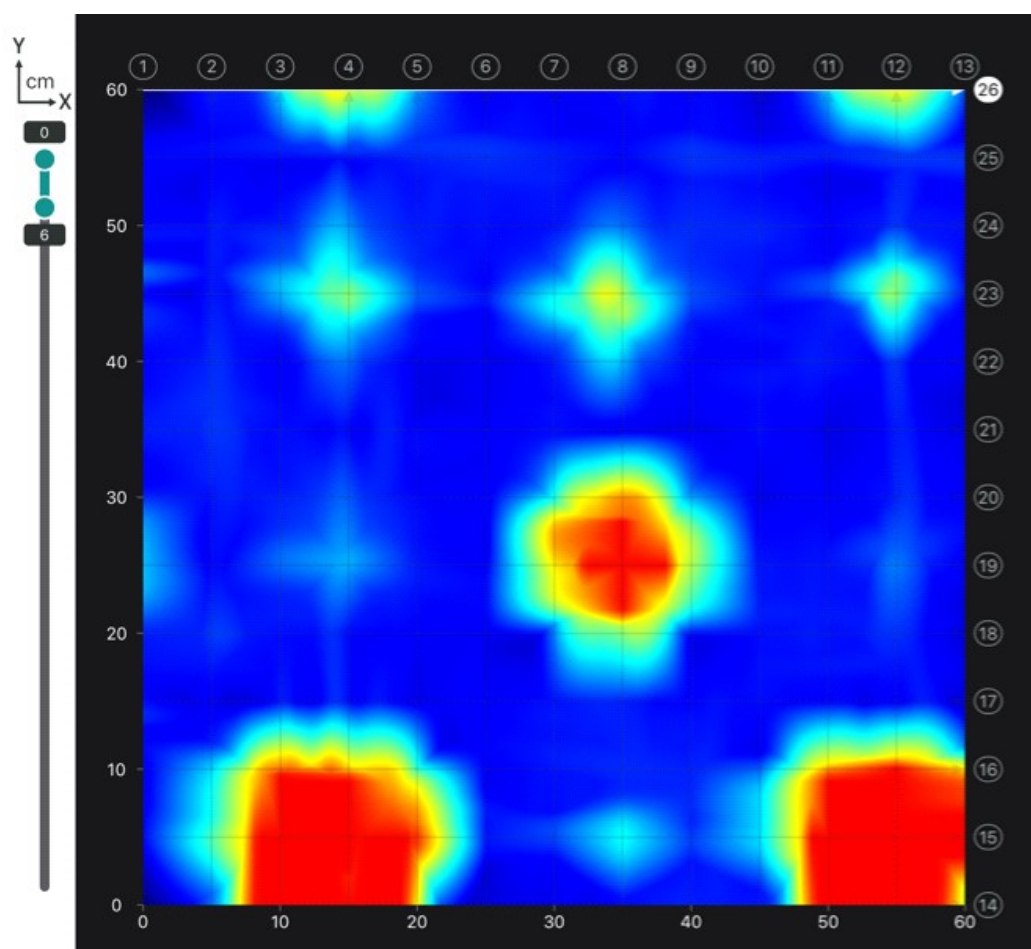
*Neupravený liniový sken ve směru x*



*Liniový sken po automatické úpravě, měřeno ve směru x*

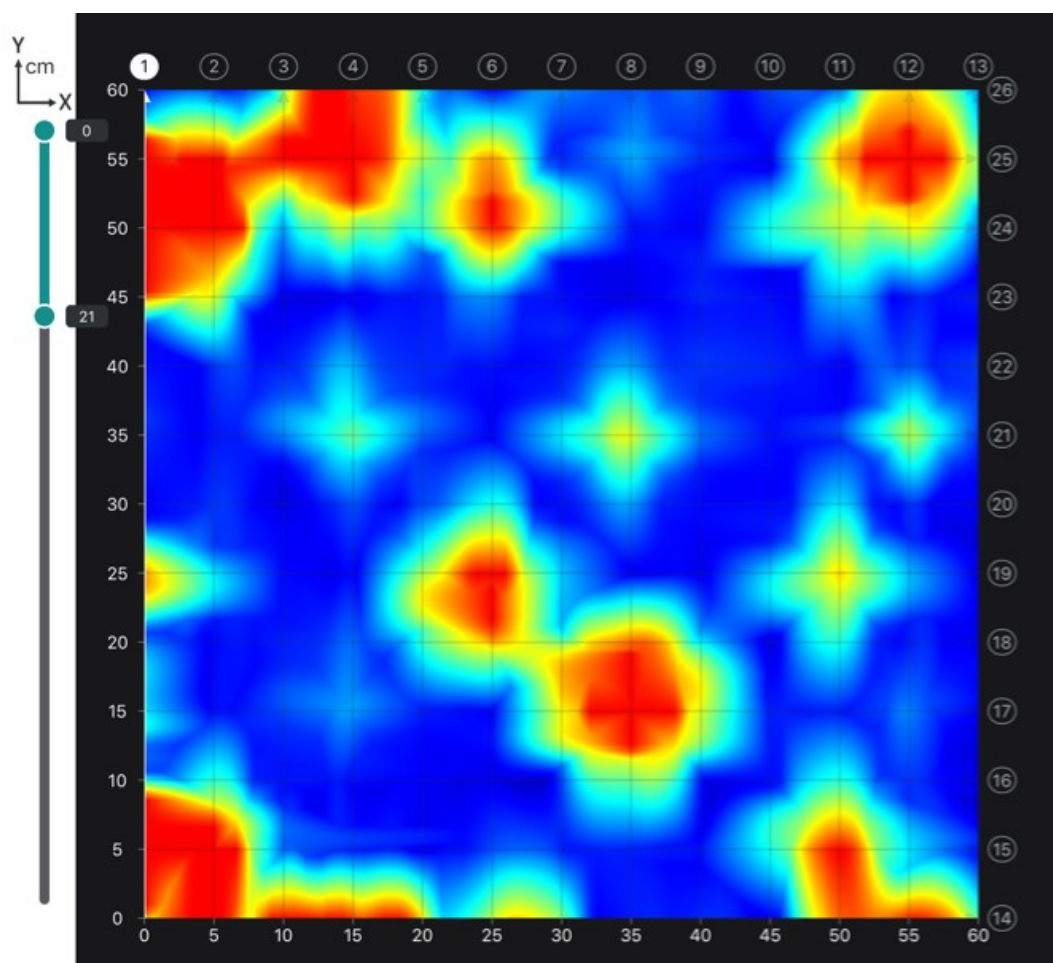


*Neupravený liniový sken ve směru x s obalovou křivkou a vyznačenou tloušťkou zkušebního bloku*

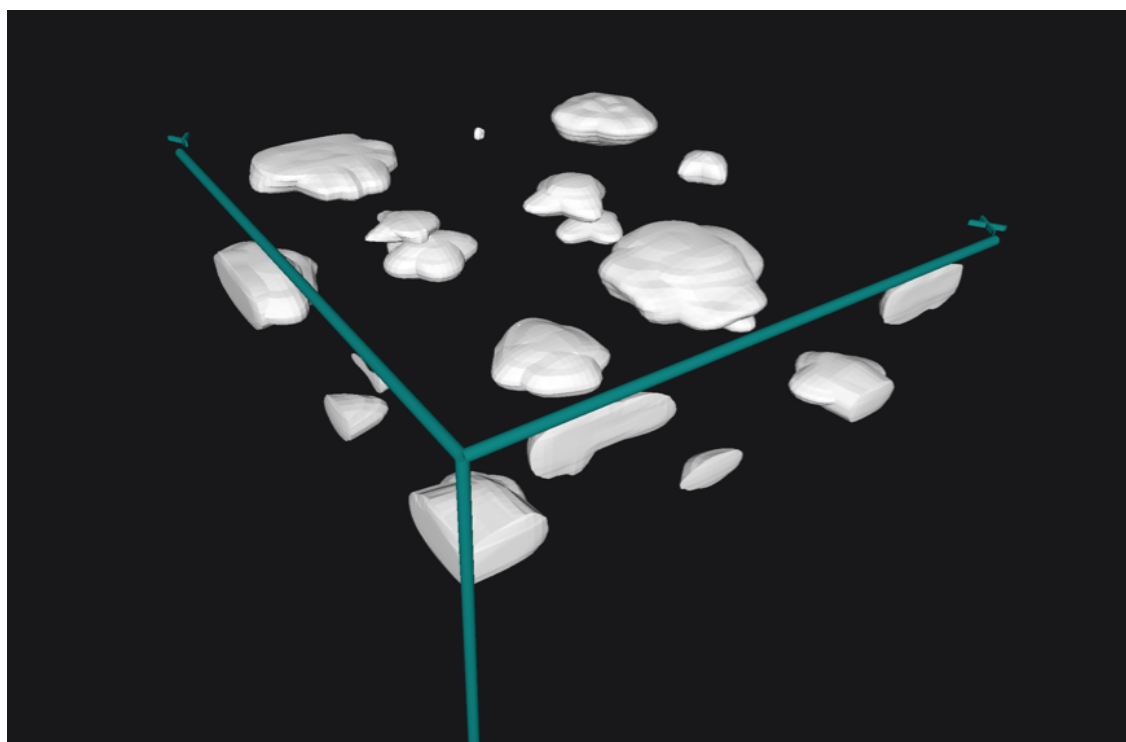


*Plošný sken, měřeno v pravém dolním rohu*





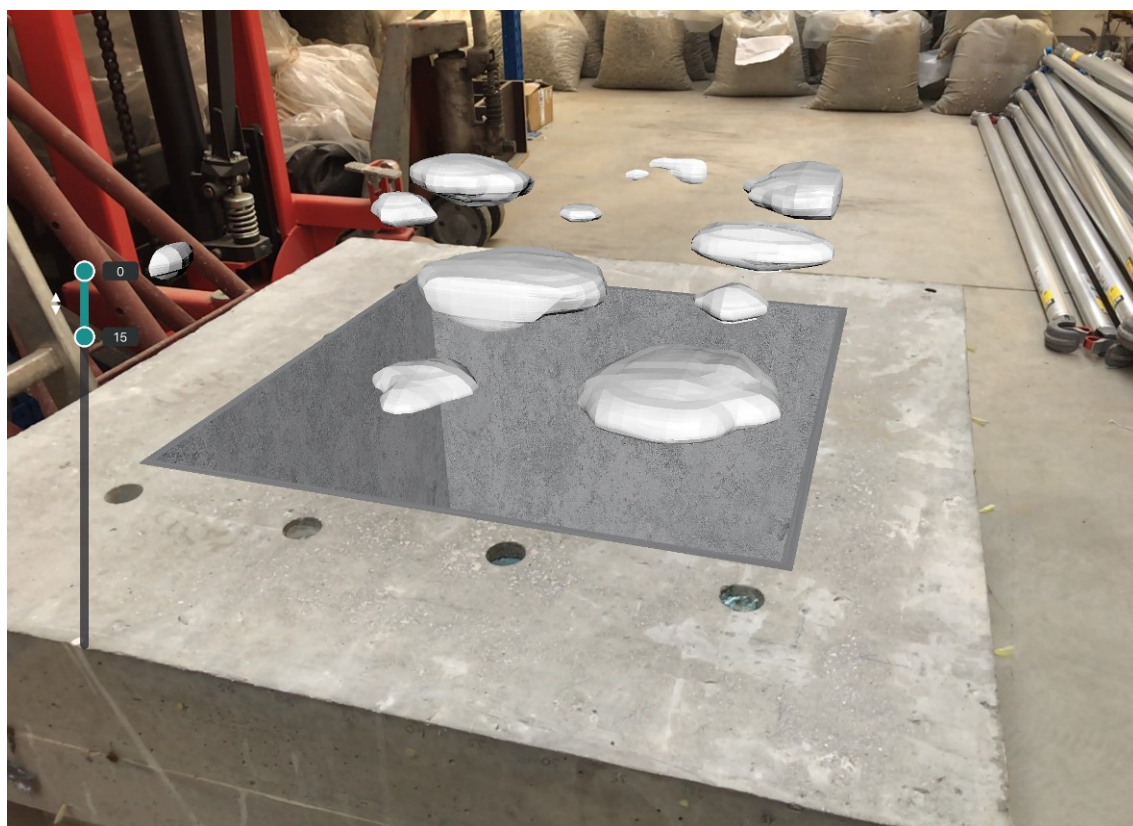
*Plošný sken – zobrazení na celou tloušťku zkušební bloku*



*3-D sken*

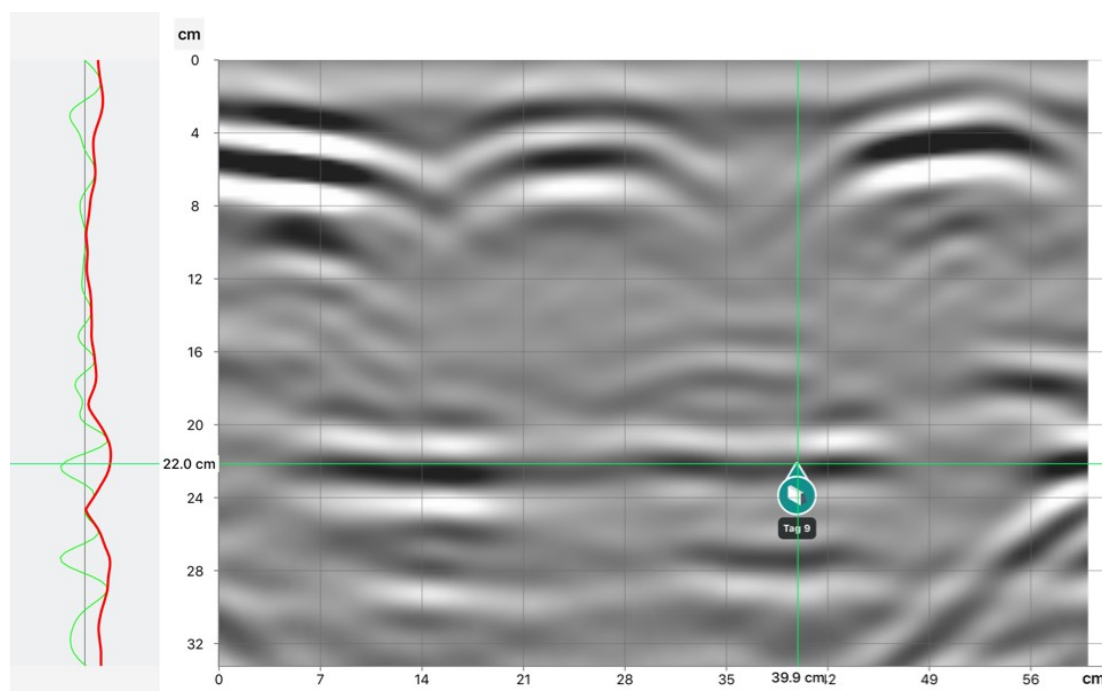


*Zobrazení 3-D skenu s využitím rozšířené reality*

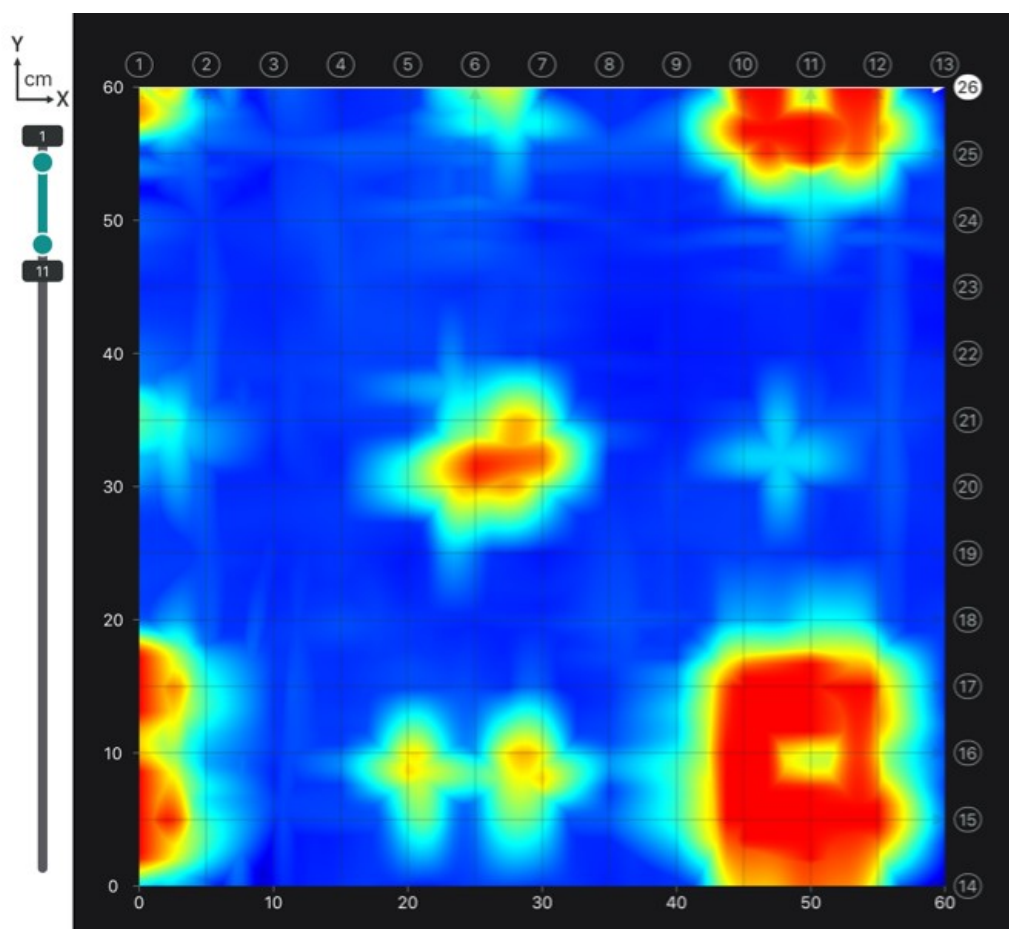


*Zobrazení 3-D skenu s využitím rozšířené reality*

## Strana B betonového zkušební bloku

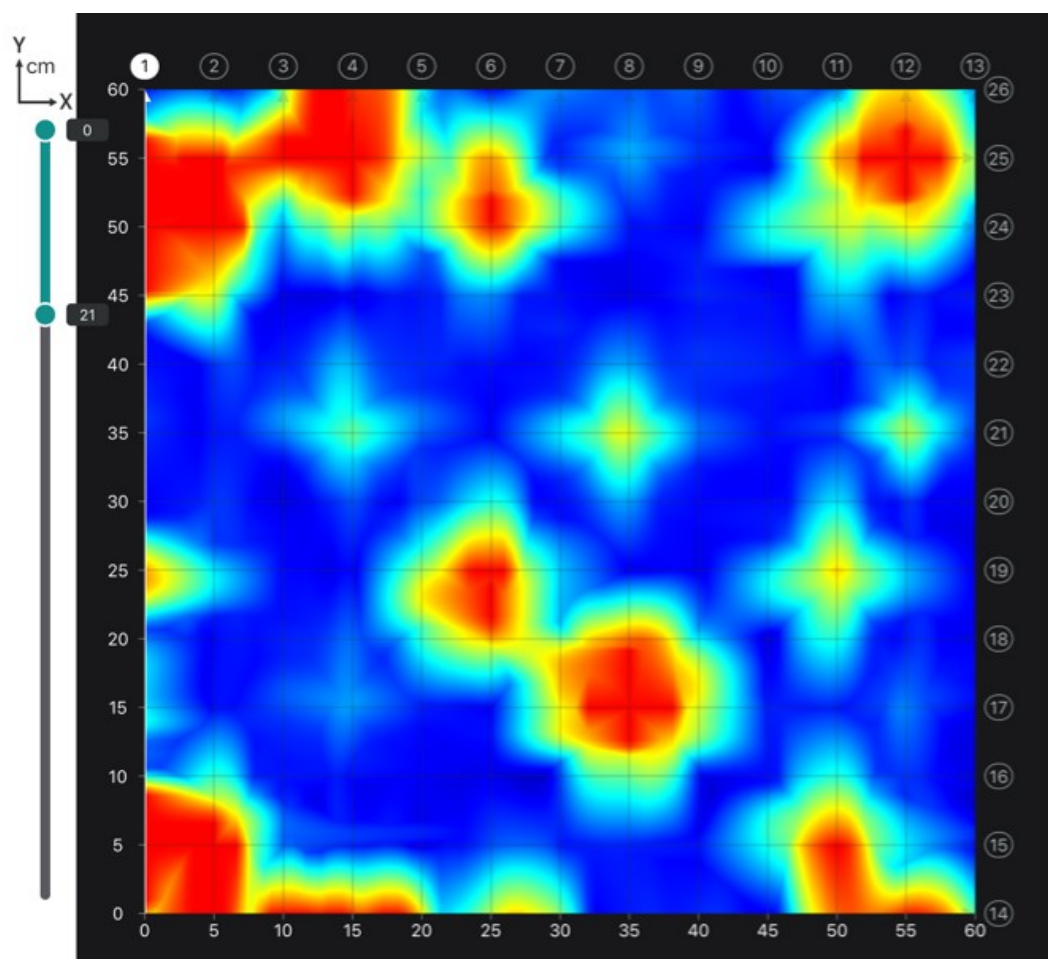


*Neupravený liniový sken ve směru osy x s obalovou křivkou a vyznačenou tloušťkou zkušební bloku*

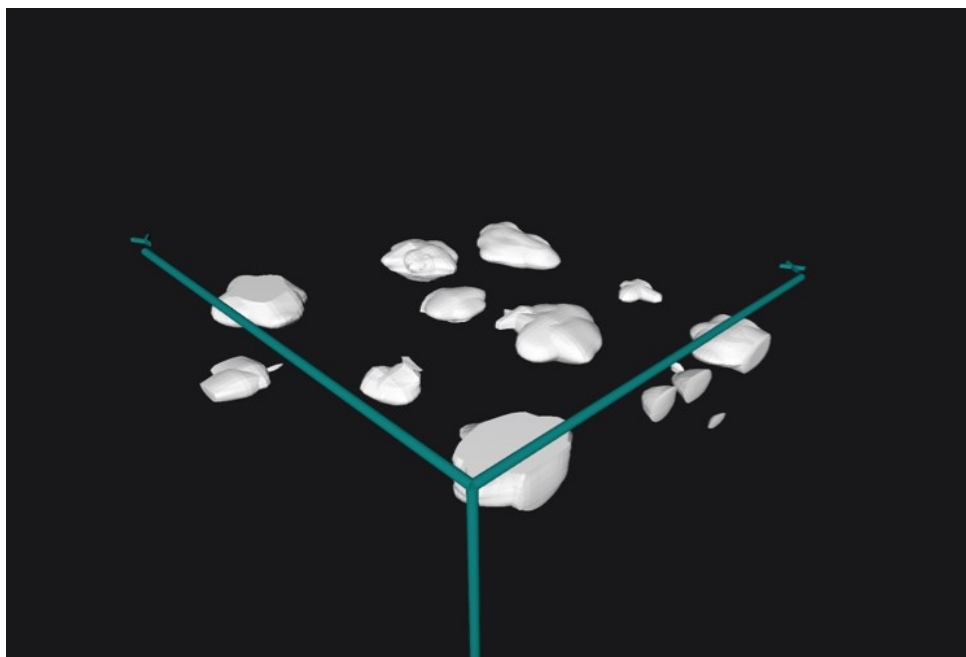


*Plošný sken – měřeno v pravém dolním rohu*





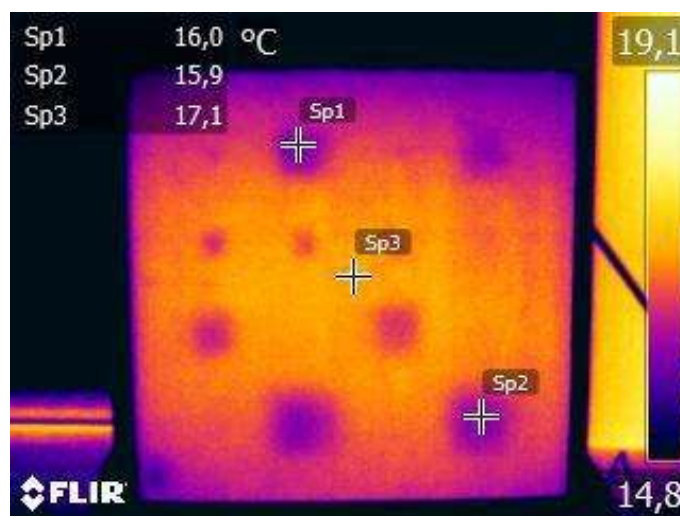
*Plošný sken – zobrazení na celou tloušťku zkušebního bloku*



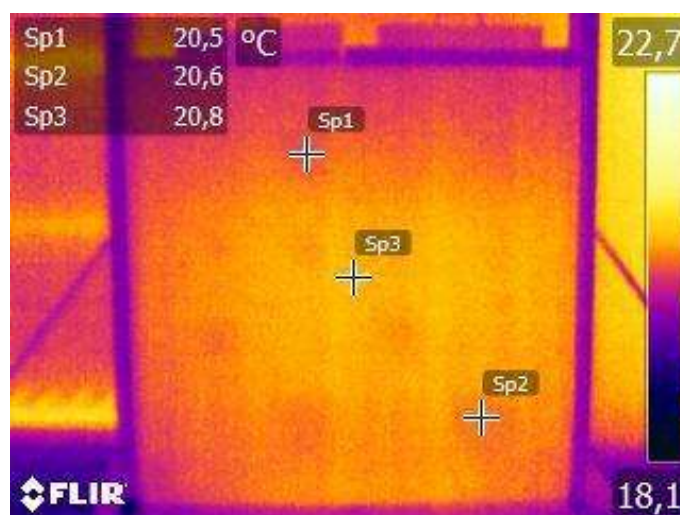
*3-D sken*

## PŘÍLOHA A.5 – TERMOKAMERA

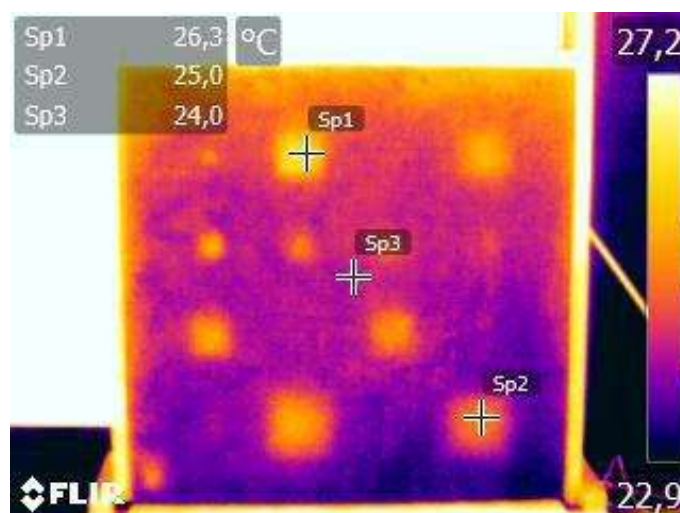
Strana A, měřeno ve stínu termokamerou FLIR E60bx v létě 2016



Čas měření 5:00



Čas měření 7:00



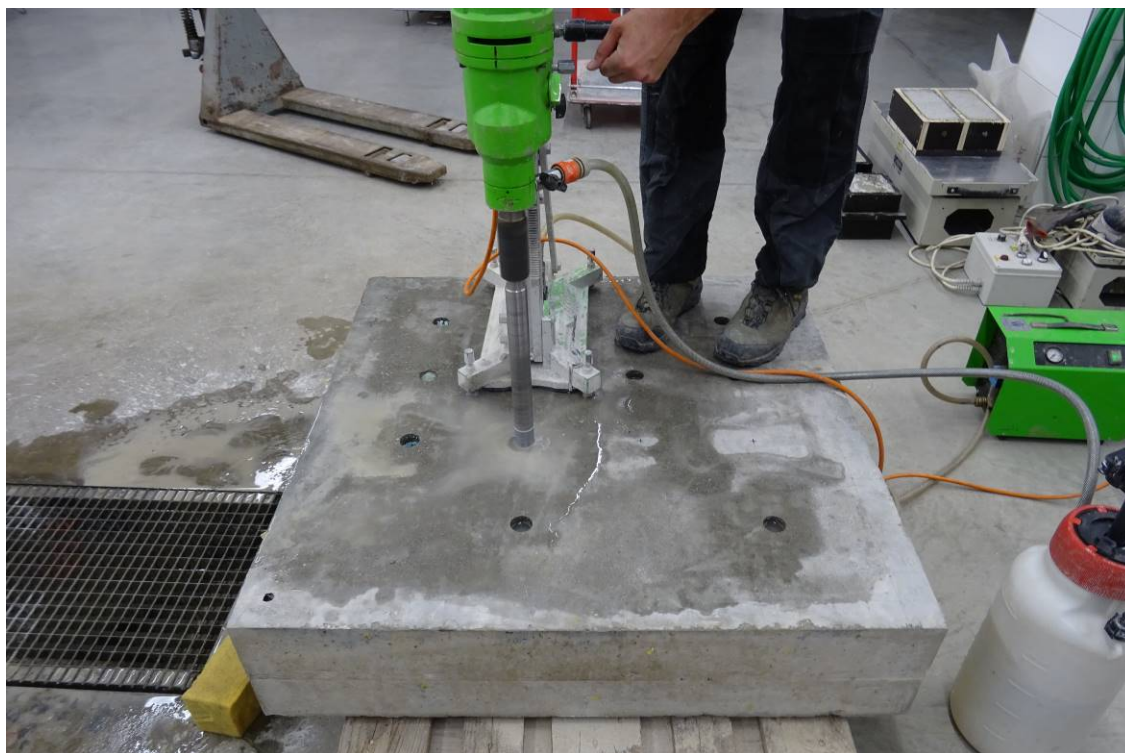
Čas měření 13:00



## PŘÍLOHA A.6 – ODBĚR JÁDROVÝCH MIKRO-VÝVRTŮ



*Příprava na odběr jádrových mikro-vývrtů na straně A betonového bloku*



*Odběr jádrových mikro-vývrtů ze strany A betonového bloku*



*Odběr jádrových mikro-vývrtů ze strany B betonového bloku*

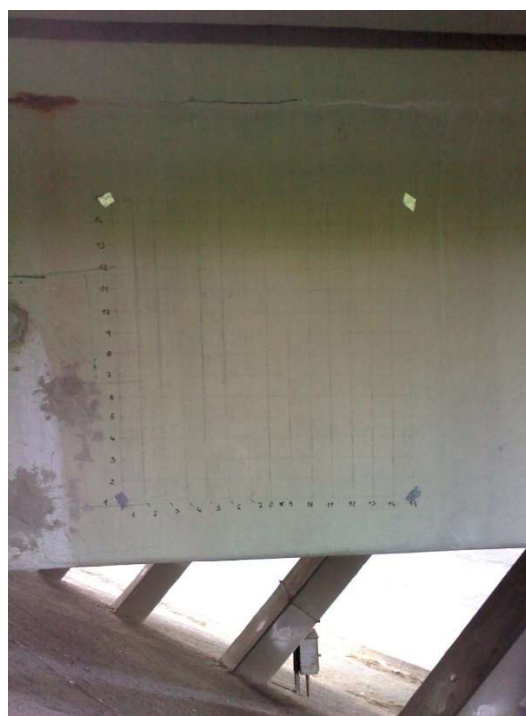
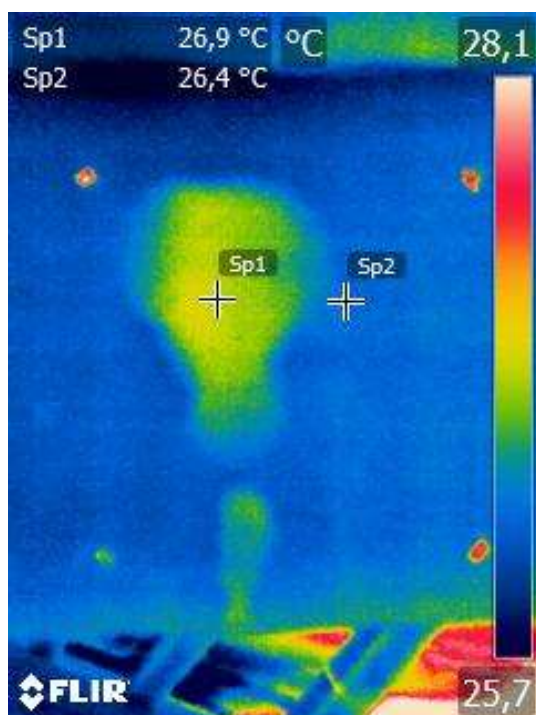


*Strana B betonového bloku po odběru jádrových mikro-vývrtů*

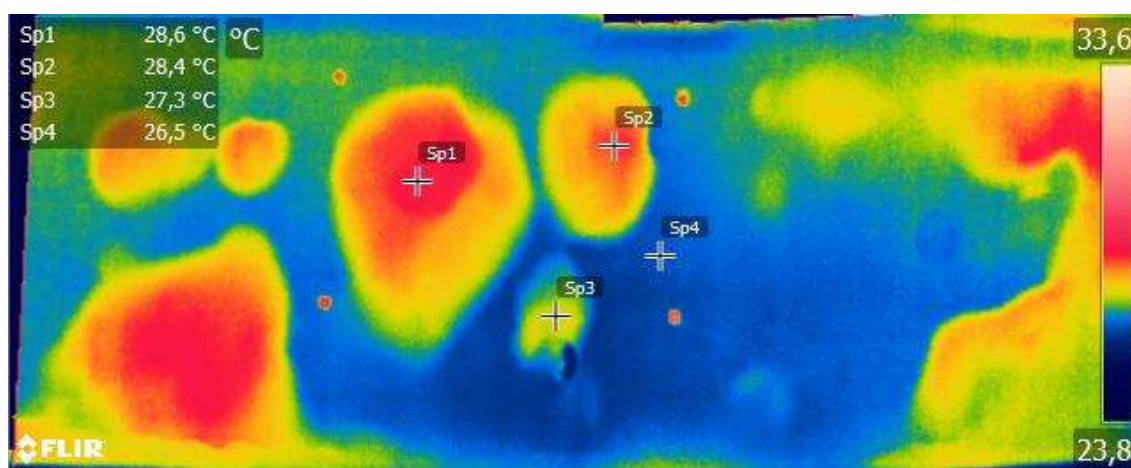


## PŘÍLOHA B – MĚŘENÍ NA BETONOVÉM MOSTĚ

### PŘÍLOHA B.1 – TERMOGRAFIE

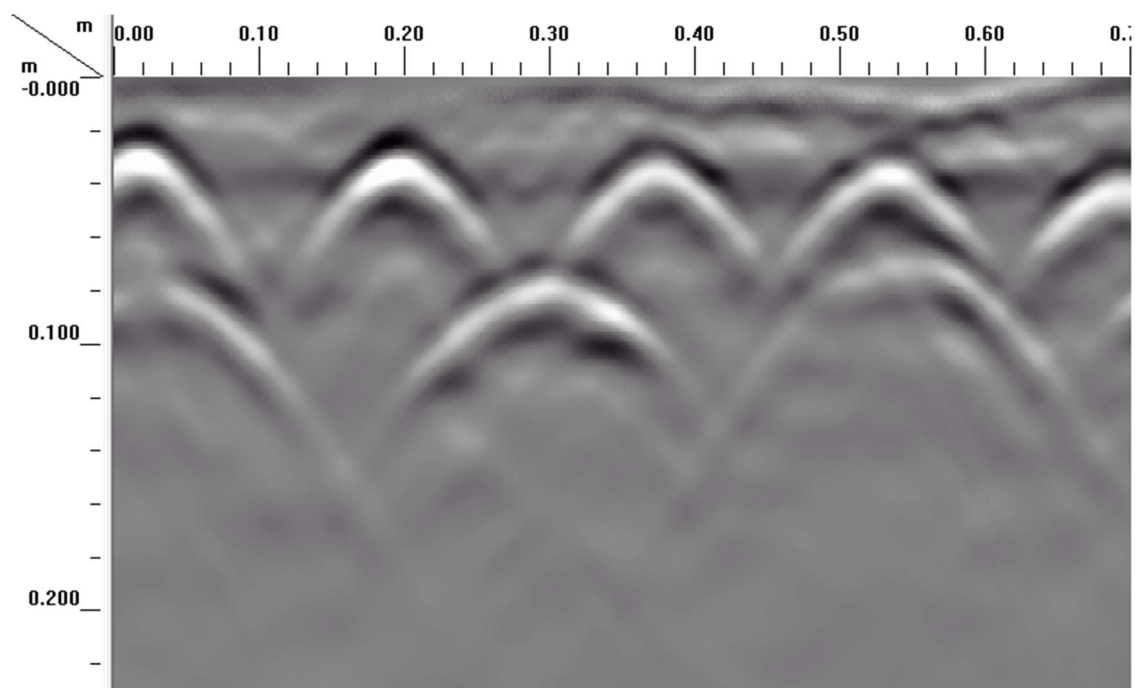


*Termogram – nosník u opěry č. 1*

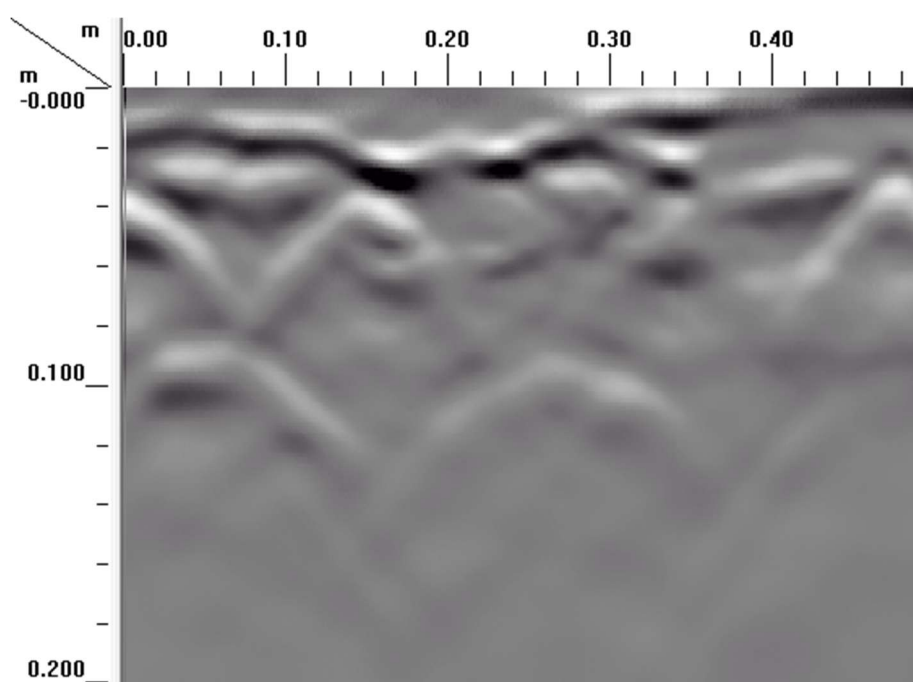


*Panoramatický termogram – nosník u opěry č. 2*

## PŘÍLOHA B.2 – GEORADAR GSSI



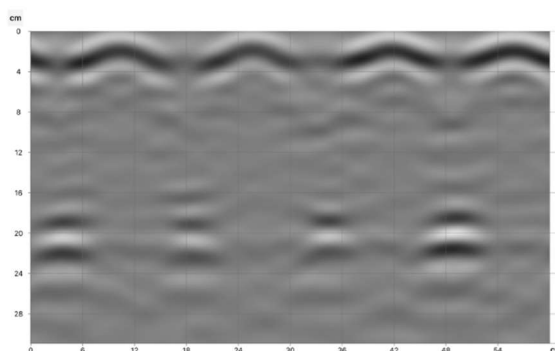
*Liniový sken ve směru osy y – nosník u opěry č. 1*



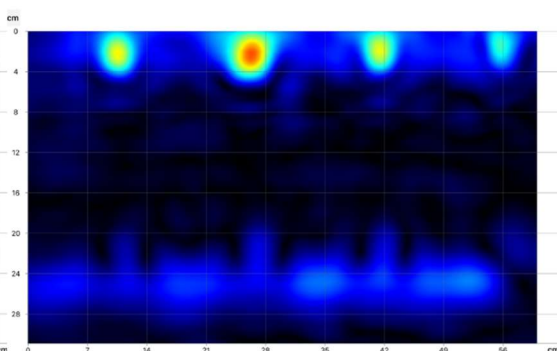
*Liniový sken ve směru osy y – nosník u opěry č. 2*

## PŘÍLOHA B.3 – GEORADAR PROCEQ

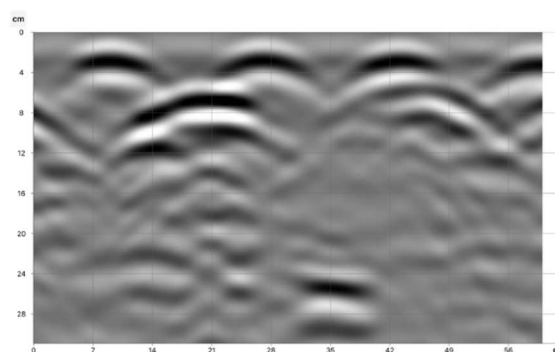
### Nosník u opěry č.1



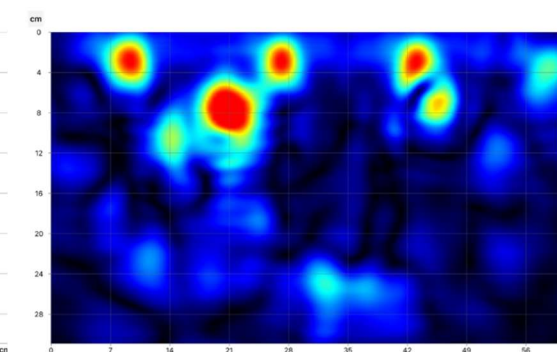
*Liniový sken ve směru osy x*



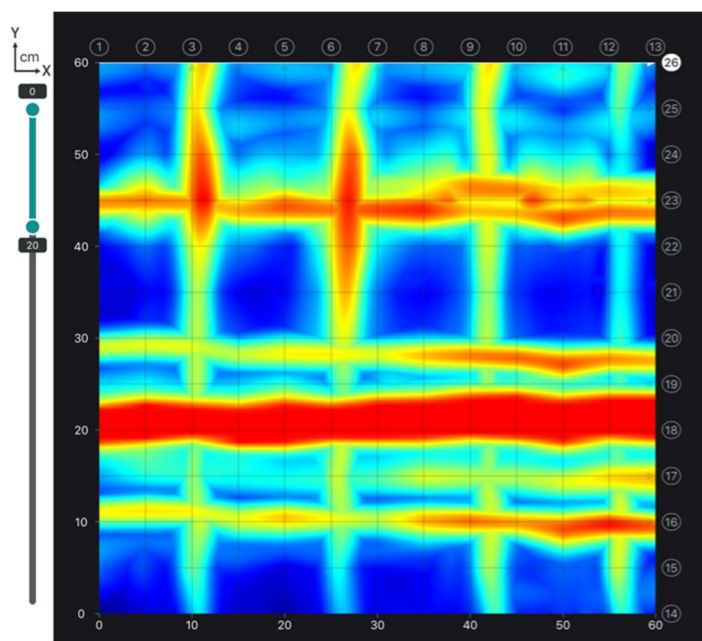
*Liniový sken ve směru osy x – po automatické úpravě*



*Liniový sken ve směru osy y*



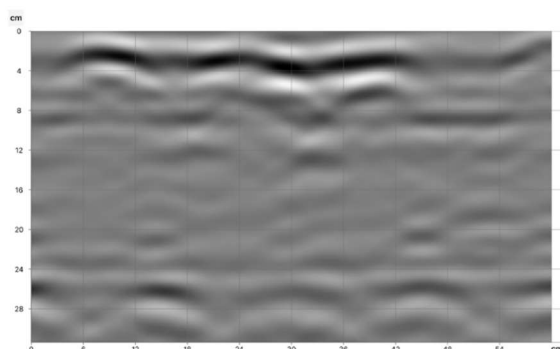
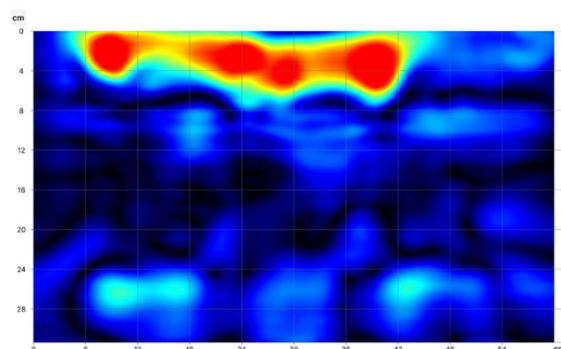
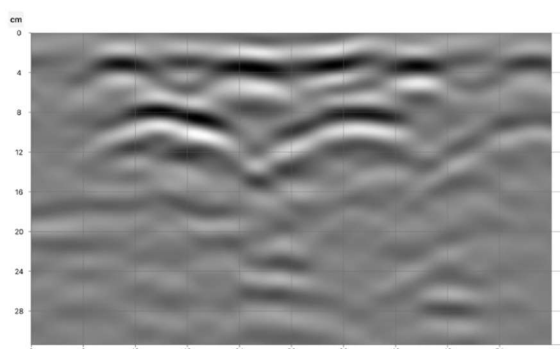
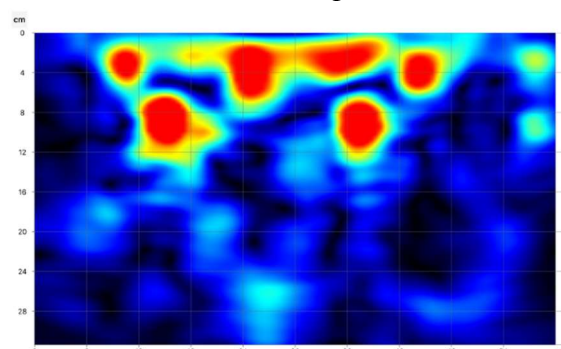
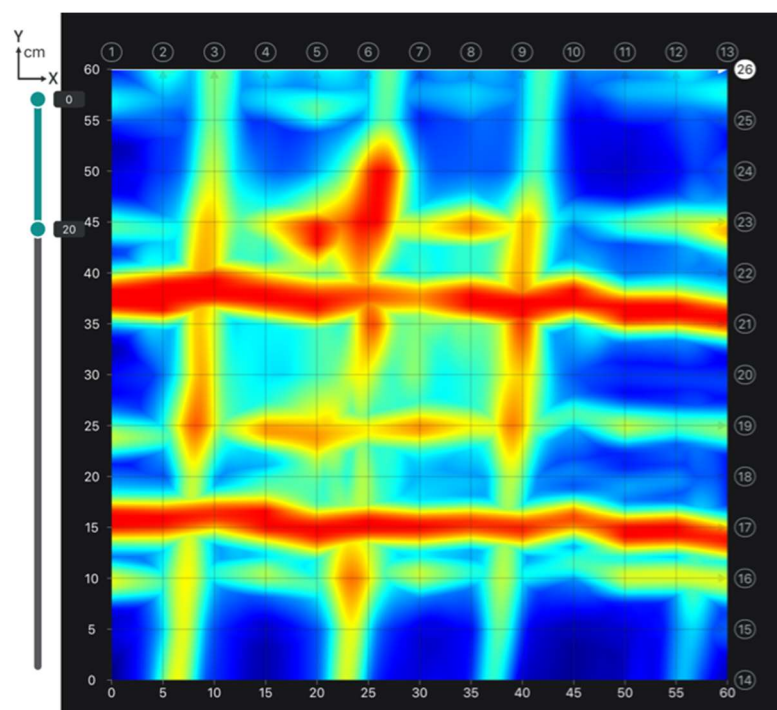
*Liniový sken ve směru osy y – po automatické úpravě*



*Plošný sken z hloubky 0-20 cm*



## Nosník u opěry č.2

*Liniový sken ve směru osy x**Liniový sken ve směru osy x – po automatické úpravě**Liniový sken ve směru osy y**Liniový sken ve směru osy y – po automatické úpravě**Plošný sken z hloubky 0-20 cm*

## PŘÍLOHA B.4 – JÁDROVÉ MIKRO-VÝVRTY



*Otvor po vrtání do nosníku nad opěrou č. 1*



*Otvor po vrtání do nosníku nad opěrou č. 2*

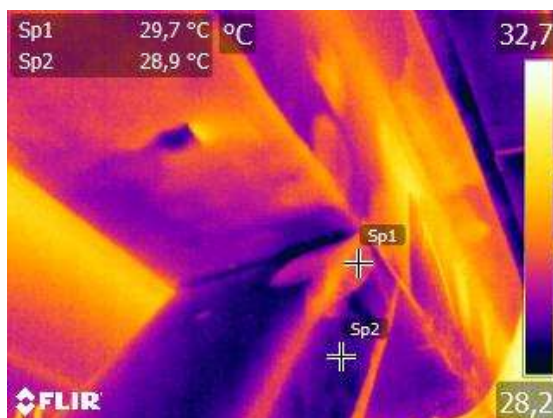


## PŘÍLOHA C – TERMOGRAMY DALŠÍCH MOSTŮ

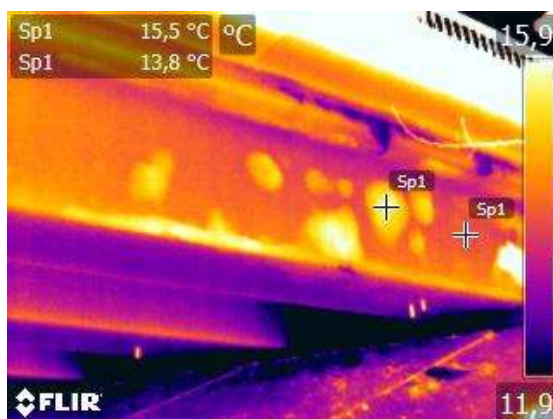
Všechny termogramy uvedené v příloze C byly pořízeny pomocí termokamery FLIR E60bx.

### PŘÍLOHA C.1 – MOST 50-003..2

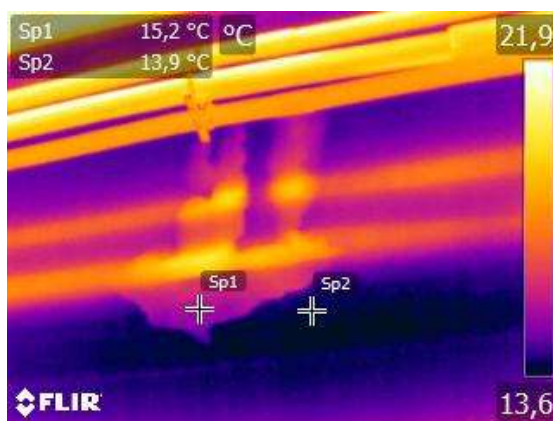
Tento most byl předmětem porovnávacího měření v kapitole 8.



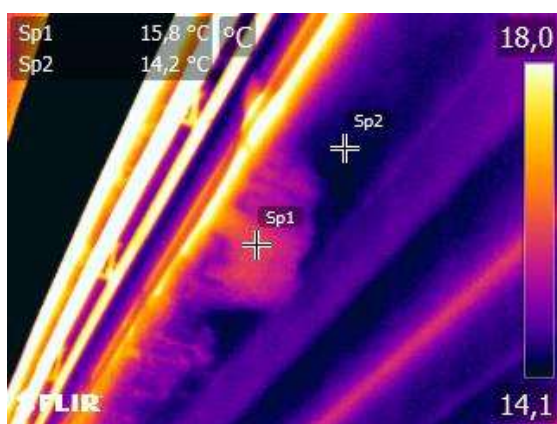
*Delaminace na šikmé stojce a na nosníku*



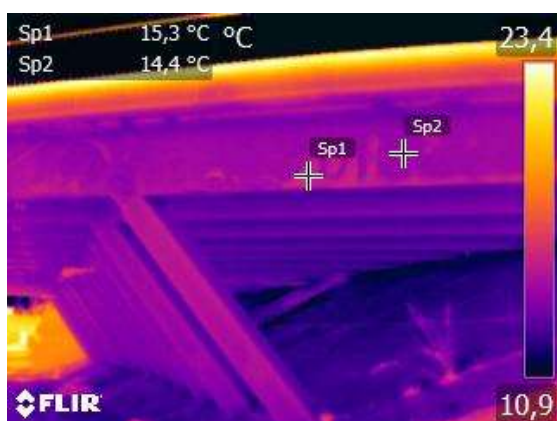
*Vzdálenější pohled na zkoumaný nosník nad opěrou č. 2*



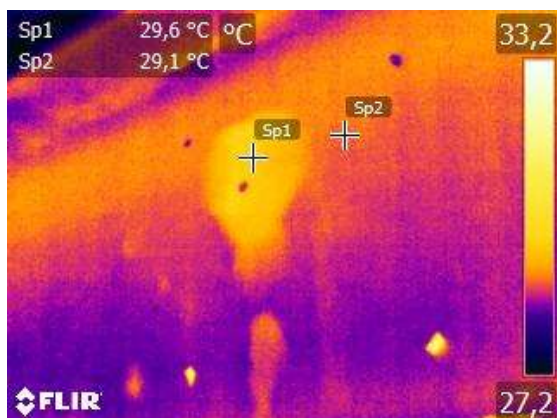
*Delaminace na nosníku pravděpodobně urychlená zatékáním od poškozené izolace*



*Delaminace na podhledu nosníku, o kus dál je již krycí vrstva odtržená*



*Boční pohled na most, nosník má částečně delaminovaný povrch, několik kusů betonové krycí vrstvy již odpadlo*

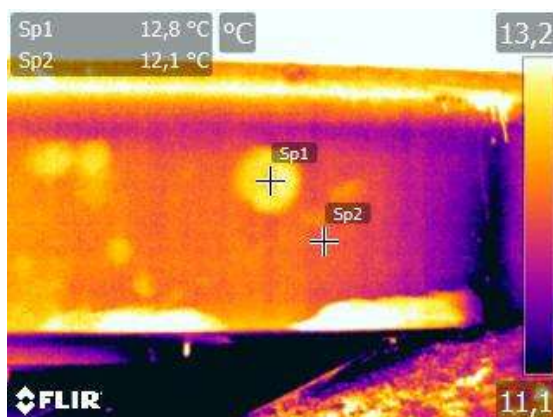


*Pohled na zkoumanou delaminaci na nosníku nad opěrou č. 1*

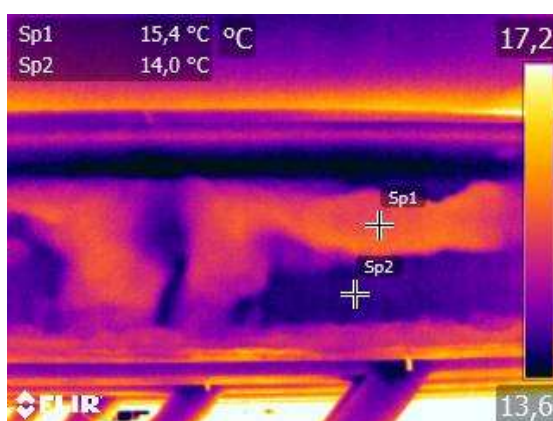


## PŘÍLOHA C.2 – MOST 50-003..1

Tento most je přilehlý ke zkoumanému mostu (kapitola 8) a vede po něm provoz v opačném směru.



*Delaminace na povrchu krajního nosníku nad opěrou č. 2*

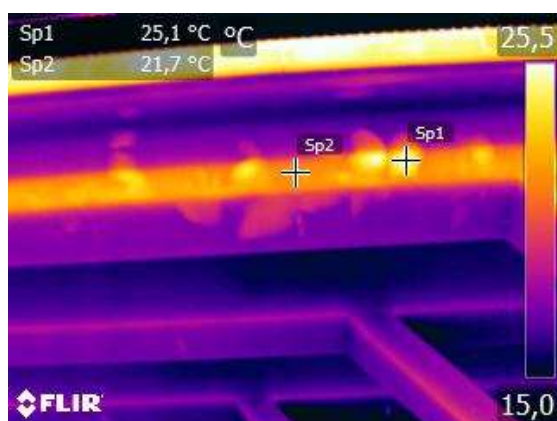


*Delaminace na povrchu krajního nosníku nad opěrou č. 1*



*Delaminace nad šikmou stojkou u opěry č. 1, část betonové krycí vrstvy již odpadla*

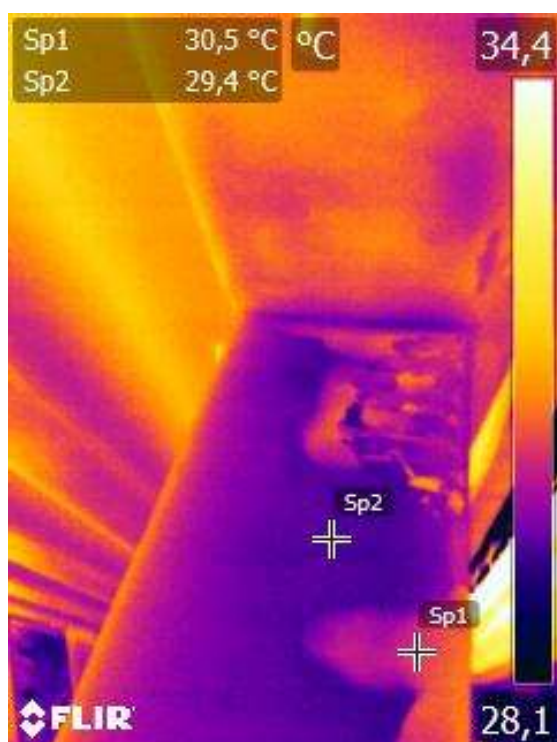




*Delaminace na povrchu nosníku, částečně vystavenému slunečnímu záření*



*Delaminace na povrchu nosníku nad opěrou č. 2*

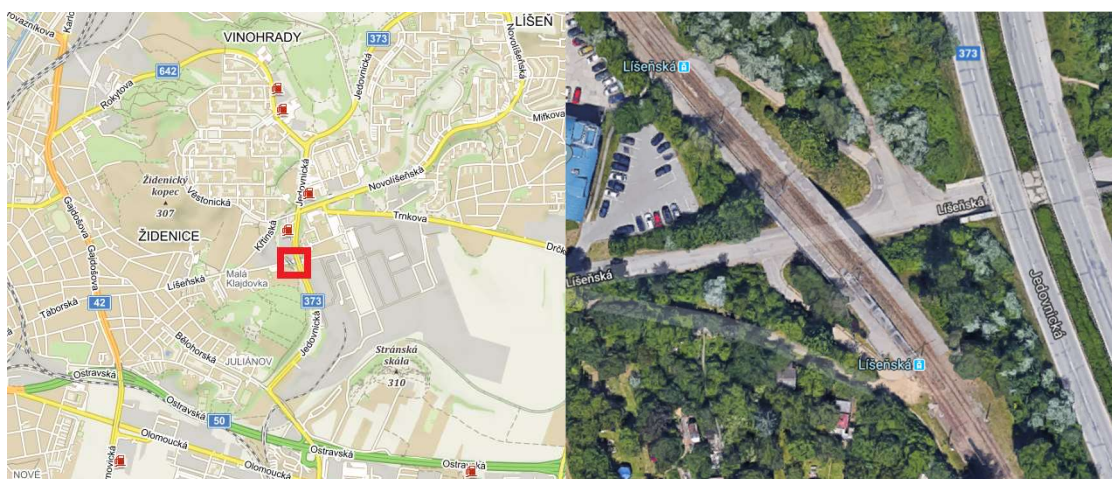


*Delaminace na povrchu šikmé stojky u opěry č. 1*



## PŘÍLOHA C.3 – MOST BM-T590

Tramvajový most se nachází na rozhraní městských částí Brno-Líšeň a Brno-Židenice a překlenuje ulici Lišeňskou. Měření bylo provedeno v odpoledních hodinách v březnu roku 2016. Při měření se boční strana mostu orientovaná jihozápadním směrem intenzivně ohřívala vlivem dopadajícího slunečního záření. Obzvláště tenké vrstvy delaminované sanace se zahřály na více než 30 °C. Poslední dvojice obrázků pochází z května roku 2017. V mezidobí byla provedena oprava sanace.

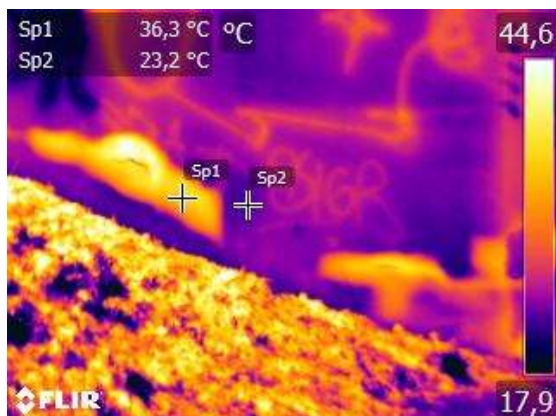


*Delaminace na křídle opěry (směr centrum Brna)*

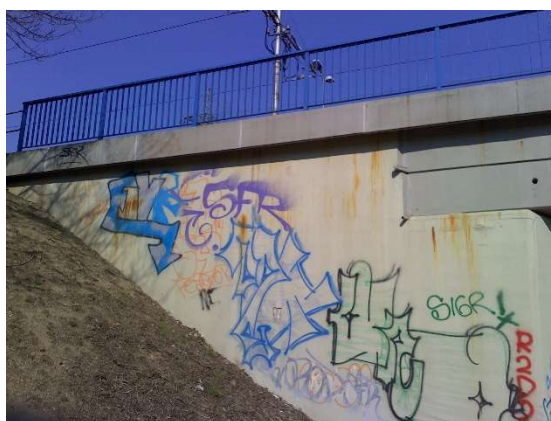


*Delaminace sanace na křídle opěry (směr Líšeň)*

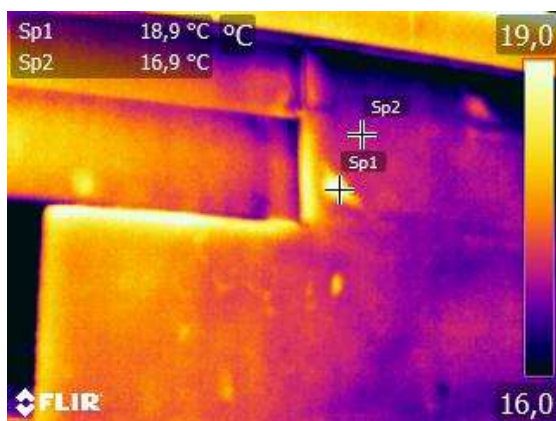




*Delaminace sanace na křídle opěry (směr Líšeň)*



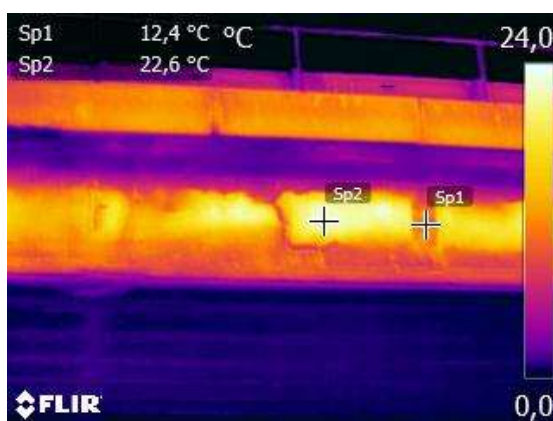
*Delaminace sanace na křídle opěry (směr Líšeň)*



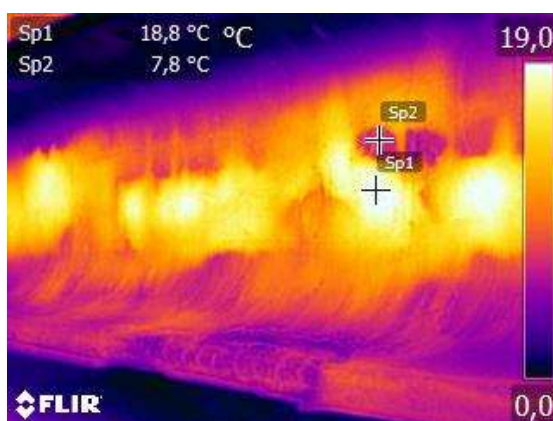
*Po opravě sanace byly původní delaminace odstraněny, nicméně se na křídle opěry (směrem na centrum) objevily nové*

## PŘÍLOHA C.4 – MOST 50-007

Most se nachází v katastru obce Holubice a převádí silnici I/50 přes místní komunikaci. První měření bylo provedeno v listopadu roku 2015 v odpoledních hodinách. Boční strana krajního nosníku I73 byla v tuto dobu intenzivně zahřívána dopadajícím slunečním zářením, což mělo za následek vytvoření výrazného teplotního kontrastu. Třmínky krajního nosníku bohužel neměly dostatečné krytí a na mnoha místech podlehly korozi a zavinily odtržení tenké betonové krycí vrstvy.



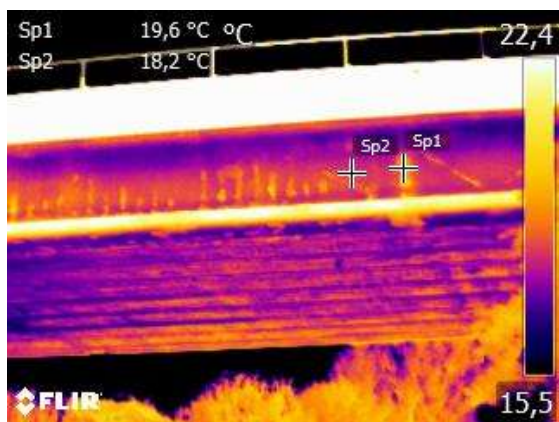
*Boční pohled na nosník, v bodě Sp1 již krycí vrstva odpadla*



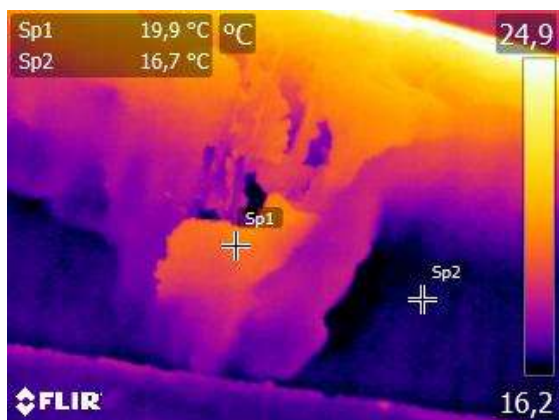
*Delaminace na stojině nosníku I73*



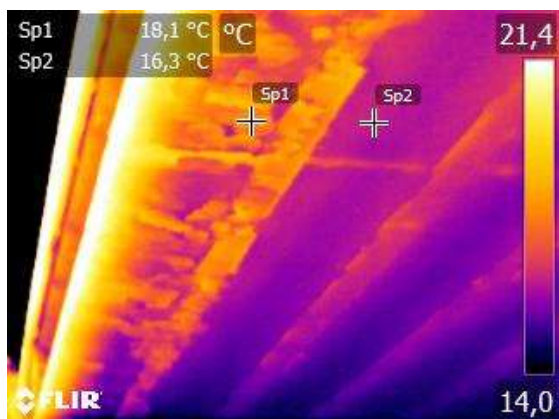
Další měření na tomto mostě bylo provedeno v květnu roku 2016. V odpoledních hodinách bylo možno zaznamenat i delaminace na površích, které nebyly vystaveny slunečnímu záření.



*Na druhé straně mostu probíhá odlupování betonové krycí vrstvy nad třmínky*



*Podhled krajního nosníku s delaminací*

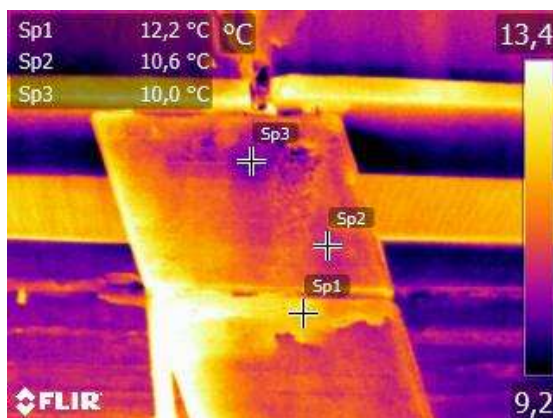
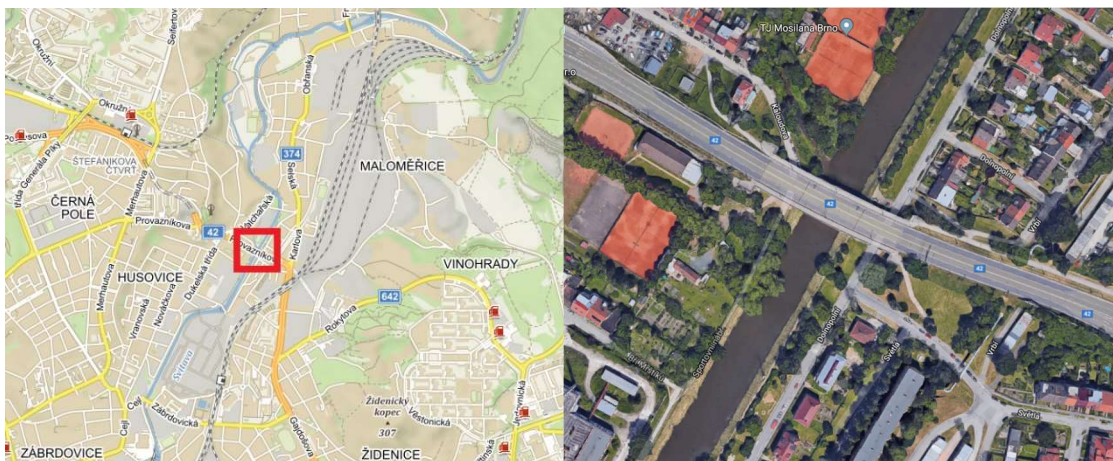


*Podhled nosné konstrukce mostu, delaminace je patrná především na spodní ploše krajního nosníku*

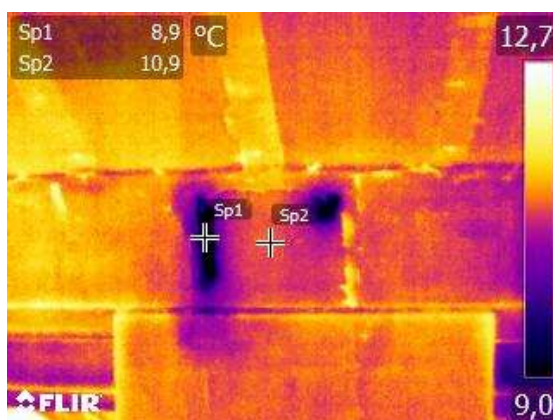


## PŘÍLOHA C.5 – MOST 42-006

Most převádí automobilovou dopravu přes řeku Svitavu, která v tomto místě tvoří hranice městských čtvrtí Husovice a Maloměřice. Ulice Provazníkova vedoucí po mostě je zároveň silnicí první třídy s označením I/42, jež tvoří velký městský okruh Brna. Měření bylo provedeno v dubnu roku 2016 v dopoledních hodinách, proto není teplotní kontrast tak výrazný. Nosná konstrukce mostů je tvořena nosníky I73. V tomto případě byly stojiny nosníků na rozdíl od jejich spodních ploch téměř bez delaminací.



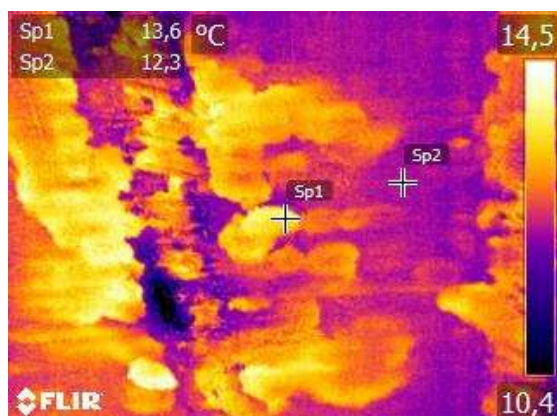
*Delaminace na mezilehlé opěře*



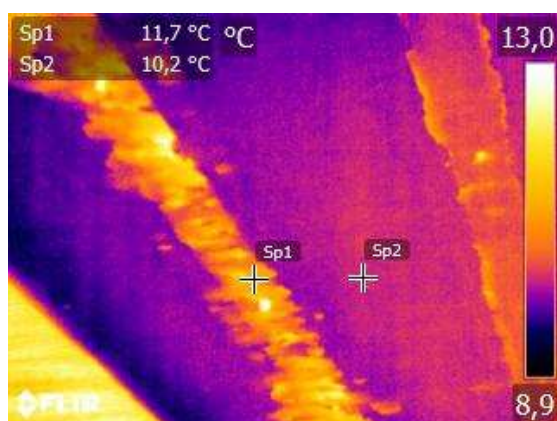
*Zátok na úložná práh opěry pravděpodobně poškozeným mostním závěrem*



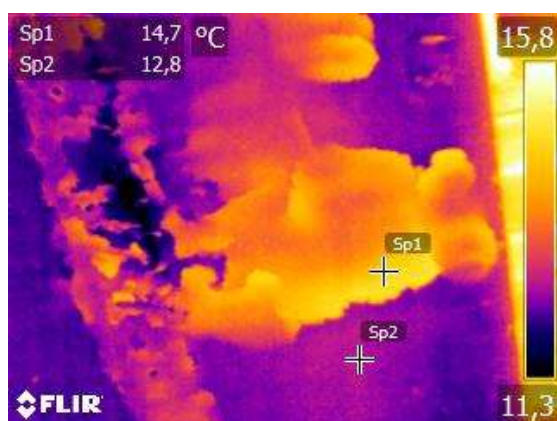
Na následujících obrázcích je patrné, že zatékání na spodní část nosné konstrukce probíhá především skrz dobetonávku mezi nosníky.



*Delaminovaný spodní povrch prefabrikovaných nosníků I73*



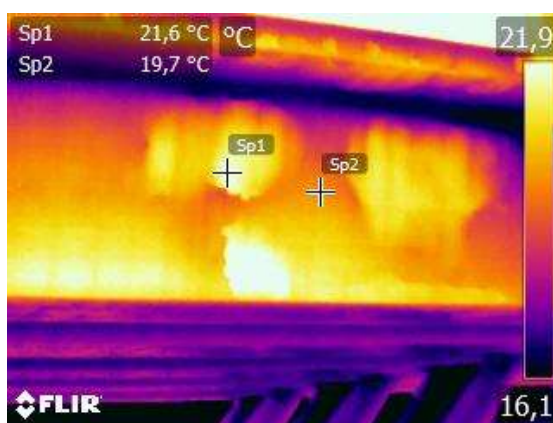
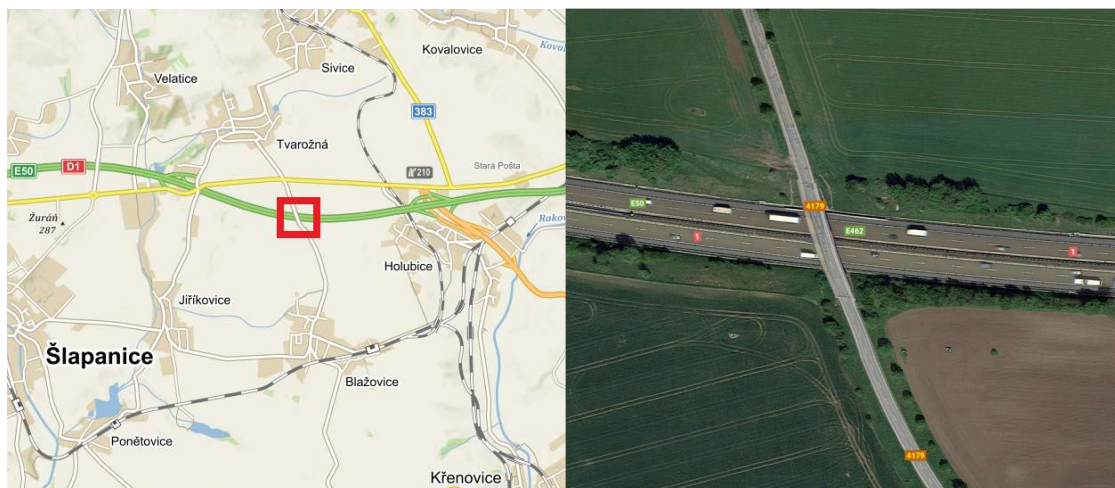
*Delaminace a koroze výztuže dobetonávky mezi nosníky*



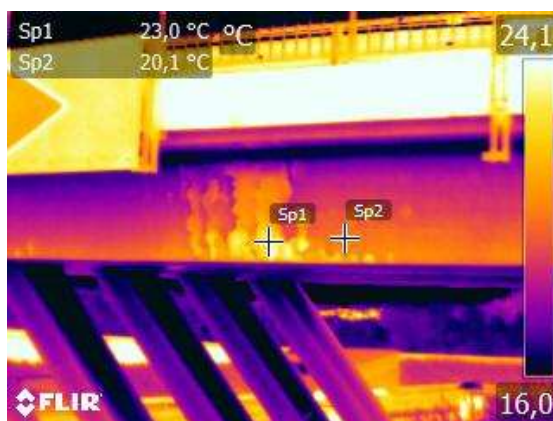
*Delaminovaný spodního povrchu nosníku s velmi malým krytím*

## PŘÍLOHA C.6 – MOST 3833-1

Most převádí provoz na silnici třetí třídy III/03833 přes dálnici D1 v km 205,8. Most se nachází v katastru obce Tvarožná v okrese Brno-venkov. Byl navržen jako integrovaná konstrukce – krajní opěry jsou nahrazeny koncovými příčníky podepřenými šikmými stojkami. Nosnou konstrukci tvoří komorové nosníky.



*Delaminace na boční stěně nosníku (nad opěrou směr Tvarožná)*

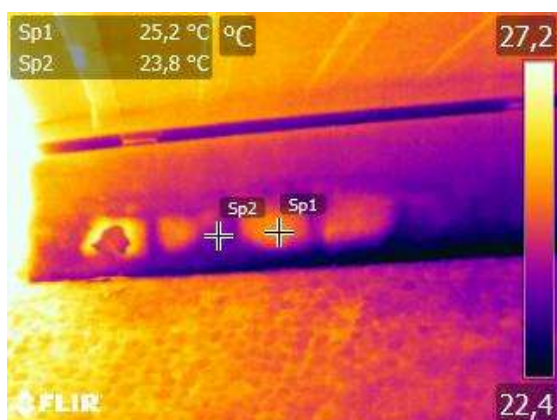
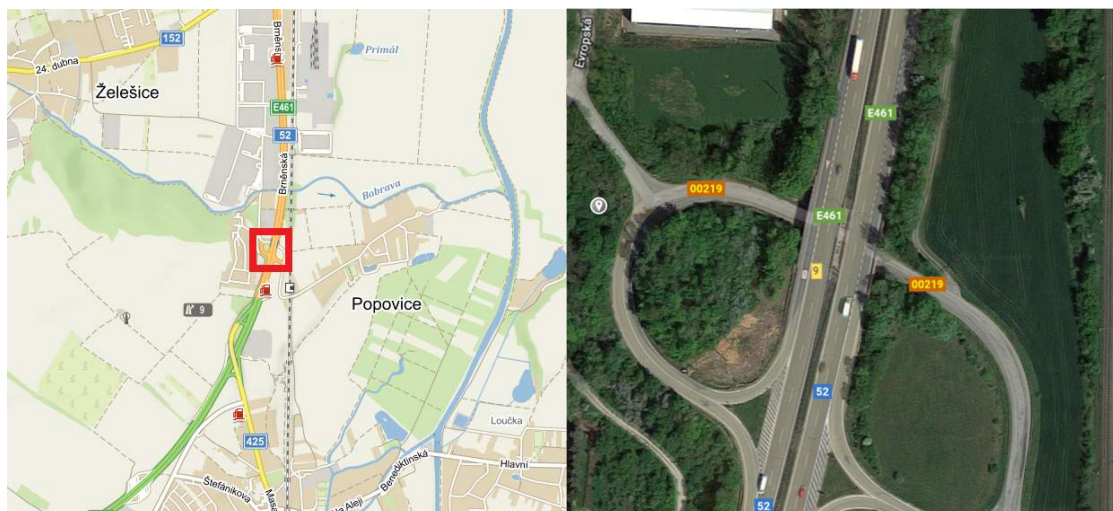


*Delaminace na boční stěně nosníku (nad opěrou směr Blažovice)*

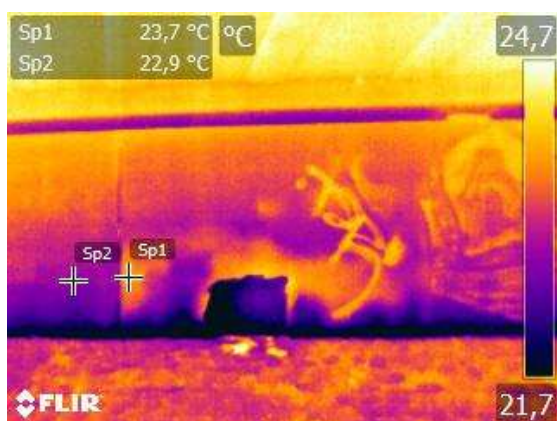


## PŘÍLOHA C.7 – 52-023..3

Most je součástí mimoúrovňové křižovatky a převádí silnici první třídy I/52 přes silnici třetí třídy III/00219. Most se nachází v katastru obce Modřice, která sousedí s jižním okrajem města Brna. Na obrázcích je zobrazena porucha sanace na opěrách mostu.



*Delaminace sanovaného povrchu na opěře (směr Brno)*



*Delaminace sanovaného povrchu na opěře (směr Vídeň)*